

بررسی اثرات متقابل جزایر گرمایی و آلودگی شهری و تقاضای انرژی؛ مرور نظام‌مند رویکردهای مدل‌سازی و مؤلفه‌های کلیدی

مریم ترکمن^(۱)، ریحانه پهلوانی^(۲)، سمانه جلیلی صدرآباد^(۳)، مصطفی بهزادفر^(۴)

۱- دانشجوی دکتری، گروه شهرسازی، دانشکده معماری و شهرسازی، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد، طراحی شهری، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران.

۳- دانشیار، گروه شهرسازی، دانشکده معماری و شهرسازی، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران (نویسنده

مسئول s_jalili@iust.ac.ir):

۴- استاد، گروه شهرسازی، دانشکده معماری و شهرسازی، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

مقاله مروری

تاریخ دریافت: ۱۴۰۵-۰۳-۱۶

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۵-۰۵-۲۴

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵-۰۵-۲۷

چکیده

رشد شتابان شهرنشینی، افزایش تراکم کالبدی و تغییر ویژگی‌های سطوح شهری موجب تشدید پدیده‌هایی مانند جزیره گرمایی شهری و جزیره آلودگی شهری شده است. این پدیده‌ها علاوه بر اثرگذاری بر کیفیت هوا، آسایش حرارتی و سلامت شهروندان، می‌توانند از طریق افزایش بار سرمایشی و تغییر الگوی مصرف برق، تقاضای انرژی شهری را نیز تحت تأثیر قرار دهند. با وجود گسترش مطالعات مرتبط، هنوز درک یکپارچه‌ای از تعامل میان جزیره گرمایی شهری، جزیره آلودگی شهری و تقاضای انرژی وجود ندارد. از این رو، پژوهش حاضر با هدف مرور نظام‌مند این تعامل و شناسایی رویکردهای مدل‌سازی، مؤلفه‌های مؤثر و روابط مفهومی غالب انجام شد. در این مطالعه، مقالات مرتبط از پایگاه‌های ScienceDirect، Scopus و Google Scholar استخراج و پس از غربالگری، محتوای مطالعات منتخب با استفاده از نرم‌افزار MAXQDA تحلیل شد. در مجموع، ۴,۰۶۰ بخش‌های کدگذاری‌شده / ارجاع کدگذاری‌شده استخراج و در قالب ۱۰ کد اصلی سازمان‌دهی گردید. سپس، از تحلیل فراوانی، ماتریس ارتباط نویسنده‌گان-کدها و تحلیل هم‌رخدادی کدها برای تبیین ساختار مفهومی ادبیات استفاده شد. یافته‌ها نشان داد که بیشترین تمرکز مطالعات بر مدل‌سازی و پیش‌بینی، تقاضای انرژی متأثر از دما و جزیره گرمایی شهری، و ویژگی‌های فیزیکی و حرارتی سطوح شهری قرار دارد. در مقابل، شاخص‌های مربوط به جزیره آلودگی شهری، پویایی لایه مرزی شهری و فرایندهای شیمیایی و فیزیکی جو سهم کمتری داشته‌اند. نتایج هم‌رخدادی نیز نشان داد که تقاضای انرژی نقش مفهومی واسط میان گرمایش شهری و آلودگی هوا دارد. بر این اساس، توسعه چارچوب‌های یکپارچه و چندمقیاسی برای تحلیل هم‌زمان اقلیم شهری، کیفیت هوا و انرژی ضروری است.

کلیدواژه: تقاضای انرژی؛ جزیره گرمایی شهری؛ جزیره آلودگی شهری؛ کیفیت هوا؛ مدل‌سازی؛ مرور نظام‌مند.

۱. مقدمه

رشد سریع شهرنشینی، افزایش تراکم کالبدی، گسترش سطوح نفوذناپذیر و کاهش پوشش گیاهی باعث شده است شهرها به کانون‌های مهم تغییرات خرداقلیمی و محیطی تبدیل شوند. یکی از مهم‌ترین نمودهای این تغییرات، جزیره گرمایی شهری (UHI) است که در آن دمای مناطق شهری، به‌ویژه در بافت‌های متراکم و دارای مصالح با ظرفیت حرارتی بالا، از محیط پیرامونی بیشتر می‌شود. این پدیده پیامدهایی مانند افزایش تنش گرمایی، کاهش آسایش حرارتی، تشدید آسیب‌پذیری سلامت عمومی و افزایش مصرف انرژی، به‌ویژه در بخش سرمایه‌سازی ساختمان‌ها، به همراه دارد (Cheval et al., 2024). ویژگی‌های کالبدی و فیزیکی شهر، از جمله تراکم ساختمان‌ها، دره‌های شهری، نوع مصالح و محدودیت جریان باد، می‌توانند همزمان بر شدت گرمایش شهری و تهویه طبیعی تأثیر گذاشته و بر پراکنش آلاینده‌ها اثرگذار باشند (Ahmed et al., 2025). در این پژوهش، جزیره آلودگی شهری (UPI) به تمرکز نسبی آلاینده‌های هوا در محیط شهری نسبت به نواحی پیرامونی اطلاق می‌شود و تحت تأثیر منابع انتشار، ساختار کالبدی، شرایط هواشناسی، پایداری لایه مرزی و فرایندهای شیمیایی و فیزیکی جو شکل می‌گیرد. بنابراین، UPI نه تنها یک شاخص کیفیت هوا، بلکه بخشی از سامانه پیچیده شهری است که می‌تواند با UHI و تقاضای انرژی تعامل داشته باشد.

مرور پیشینه نشان می‌دهد که مطالعات مرتبط با UHI عمدتاً در چند محور توسعه یافته‌اند: مدل‌سازی و پیش‌بینی شدت و الگوهای زمانی-مکانی UHI، بررسی پیامدهای گرمایش شهری و موج‌های گرما بر سلامت و مصرف انرژی، و ارزیابی راهبردهای کاهش و سازگاری با گرمای شهری (Ahmed et al., 2025; Ni et al., 2025; Ventura et al., 2024). با وجود پیشرفت‌ها، چند شکاف اصلی همچنان باقی است: تمرکز غالب بر بعد حرارتی شهر سبب شده است که جزیره آلودگی شهری و شاخص‌های UPI کمتر در تحلیل‌ها وارد شوند؛ بسیاری از مطالعات به‌صورت بخشی و غیر یکپارچه انجام شده‌اند؛ و نقش تقاضای انرژی به‌عنوان حلقه واسط میان گرمایش شهری و آلودگی شهری کمتر مفهوم‌پردازی شده است. اگرچه مطالعات متعددی به مرور نظام‌مند یا تحلیل علم‌سنجی پژوهش‌های جزیره گرمایی شهری پرداخته‌اند، تمرکز اصلی آن‌ها بر روندهای علمی، شبکه‌های دانش و عوامل مؤثر بر شدت UHI بوده است. در مقابل، پژوهش حاضر با عبور از نگاه تک‌بعدی به جزیره گرمایی شهری، تعامل میان UHI، UPI و تقاضای انرژی را بررسی کرده و تلاش می‌کند شکاف موجود در ادغام هم‌زمان فرآیندهای حرارتی، آلودگی هوا و انرژی شهری را تبیین کند.

پژوهش حاضر با استفاده از مرور نظام‌مند و تحلیل محتوای کیفی، ساختار مفهومی ادبیات موجود درباره تعامل UHI، UPI و تقاضای انرژی را استخراج می‌کند و ضمن شناسایی مؤلفه‌ها و روابط مفهومی، شکاف‌های پژوهشی این حوزه را روشن می‌سازد. سؤال اصلی تحقیق این است که ادبیات علمی موجود، تعامل میان UHI، UPI و تقاضای انرژی را چگونه مفهوم‌پردازی و مدل‌سازی کرده و چه مؤلفه‌ها و شکاف‌هایی در این چارچوب قابل شناسایی است.

۲. پیشینه پژوهش

رشد شهرنشینی و پیچیدگی الگوهای مصرف انرژی شهری اهمیت مطالعه تعامل میان جزیره گرمایی شهری (UHI)، جزیره آلودگی شهری (UPI) و تقاضای انرژی را برجسته کرده است. مرور ادبیات نشان می‌دهد که پژوهش‌های پیشین هر یک بر بعدی خاص متمرکز بوده‌اند و کمتر به تحلیل هم‌زمان این سه مؤلفه پرداخته‌اند (Attarhay Tehrani et al., 2025). با استفاده از داده ۲۷,۶۸۱ ساختمان در Phoenix نشان دادند که UHI می‌تواند مصرف انرژی سرمایه‌سازی ساختمان‌ها را افزایش دهد و مدل‌های

داده‌محور، به‌ویژه شبکه‌های عصبی عمیق، این اثر را با دقت پیش‌بینی می‌کنند، اما تعامل با آلودگی شهری مورد بررسی قرار نگرفت

دلگادو-انالس و همکاران (۲۰۲۵)، با بهره‌گیری از معماری U-Net دمای سطح خیابان در Bilbao را پیش‌بینی کردند و نشان دادند که یادگیری عمیق می‌تواند دمای شهری را با دقت بالا تخمین بزند، اما این دما هنوز به‌عنوان متغیری مستقیم در تحلیل مصرف انرژی یا آلودگی وارد نشده است. ژانگ و همکاران (۲۰۲۵)، با مدل‌های LSTM و GRU تقاضای سرمایش منطقه‌ای را پیش‌بینی کردند و نشان دادند که نحوه تقسیم‌بندی داده‌ها نقش تعیین‌کننده‌ای در دقت مدل دارد؛ با این حال، اثر UHI یا UPI به‌صورت هم‌زمان در مدل لحاظ نشده است. رضازاده و همکاران (۲۰۲۵)، یک مدل یکپارچه انرژی-انتشار-سلامت ارائه دادند که ابعاد اقتصادی، انتشار و سلامت را ارزیابی می‌کند و اهمیت آلودگی را برجسته می‌کند، اما گرمایش شهری و شدت UHI در تحلیل آن مستقیماً مورد توجه قرار نگرفته است. سولیس-ویارثال و همکاران (۲۰۲۴)، با استفاده از Isolation Forest و SHAP به شناسایی ناهنجاری‌های مصرف انرژی در شهرهای مدرن پرداختند، که نشان‌دهنده قدرت ابزارهای هوش مصنوعی در تحلیل رفتار مصرف است، ولی رابطه مستقیم با UHI و UPI در این مطالعه بررسی نشده است. تیواری و همکاران (۲۰۲۶)، با مقایسه مدل‌های Prophet، LSTM، GRU و TCN در ۱۵ شهر آمریکا نشان دادند که عملکرد مدل‌های پیش‌بینی انرژی وابسته به ویژگی‌های مکانی و افق زمانی است و هیچ مدل واحدی برای همه شهرها مناسب نیست، اما اثرات مستقیم دمای شهری یا آلودگی وارد تحلیل نشده است. در مجموع، مرور این مطالعات نشان می‌دهد که ادبیات موجود در سه مسیر اصلی حرکت کرده است: برآورد دمای شهری و UHI، پیش‌بینی تقاضای انرژی، و بهینه‌سازی انرژی _ انتشار _ سلامت یا پایش ناهنجاری‌ها. با این حال، هیچ پژوهشی تاکنون UHI و UPI را به‌صورت هم‌زمان و در ارتباط مستقیم با تقاضای انرژی تحلیل نکرده است. پژوهش حاضر با تمرکز بر ادغام این سه مؤلفه، قصد دارد شکاف موجود در ادبیات را پر کرده و پایه‌ای علمی برای سیاست‌گذاری و برنامه‌ریزی انرژی شهری فراهم کند.

۳. مبانی نظری پژوهش

۳-۱. جزیره گرمایی شهری (UHI)

تعریف و مکانیسم‌های شکل‌گیری جزیره گرمایی

جزیره گرمایی شهری به وضعیتی اطلاق می‌شود که در آن مناطق متراکم شهری به دلیل ویژگی‌های خاص کالبدی و عملکردی خود، دمای بالاتری نسبت به محیط‌های غیرشهری اطراف دارند. اصلی‌ترین مکانیسم شکل‌گیری این پدیده در محیط‌های متراکم، تشکیل «دره‌های شهری» (Urban Canyons) است؛ خیابان‌های باریک با ساختمان‌های بلند که علاوه بر محدود کردن جریان باد و تهویه طبیعی، تابش‌های حرارتی را در سطح خیابان به دام می‌اندازند (Ahmed et al., 2025). این حبس حرارتی در کنار ظرفیت ذخیره حرارتی بالای مصالح ساختمانی (مانند آسفالت و بتن)، منجر به کاهش نرخ سردشدن در شب و در نتیجه افزایش شدت UHI می‌شود.

عوامل تشدیدکننده UHI

شدت جزیره گرمایی تحت تأثیر پیچیده‌ای از عوامل قرار دارد. از یک سو، تراکم زیرساخت و سطوح نفوذناپذیر، ظرفیت جذب حرارت را افزایش می‌دهند؛ از سوی دیگر، کمبود فضاهاى سبز شهری که پتانسیل بالایی در خنک‌سازی از طریق تبخیر-تعرق

دارند، این اثر را تشدید می‌کند (Ahmed et al., 2025). در مقیاس وسیع‌تر، سناریوهای تغییر اقلیم نشان می‌دهند که هم‌افزایی گرمایش جهانی با توسعه شهری، شدت UHI را به‌طور معناداری افزایش داده و وقوع رخداد های گرمایی حاد را تسهیل می‌کند (Ni et al., 2025).

انواع و مقیاس‌های جزیره گرمایی

UHI پدیده‌ای تک‌مقیاسی نیست؛ بلکه باید در مقیاس‌های مختلف (از سطح خیابان و محله تا ناحیه شهری) تحلیل شود. برای مدل‌سازی دقیق این پدیده، استفاده از رویکردهای چندمقیاسی ضروری است، زیرا مکانیسم‌های انباشت و تخلیه گرما در هر مقیاس متفاوت‌اند. بنابراین، مداخلات طراحی شهری باید متناسب با مقیاس فضایی تحلیل شده طراحی شوند تا سیاست‌گذاری‌ها به جای راهکارهای کلی، به نتایج عملیاتی منجر شوند (Cheval et al., 2024).

۲-۳. جزیره آلودگی شهری (UPI)

اگرچه مفهوم «جزیره آلودگی شهری» (Urban Pollution Island: UPI) در مقایسه با «جزیره گرمایی شهری» (Urban Heat Island: UHI) هنوز از یک تعریف استاندارد و چارچوب مفهومی کاملاً پذیرفته‌شده برخوردار نیست، اما در مطالعات مرتبط با کیفیت هوای شهری، این مفهوم برای توصیف افزایش نسبی غلظت، تجمع و ماندگاری آلاینده‌های جوی در مناطق شهری نسبت به نواحی پیرامونی مورد استفاده قرار گرفته است (Ahmed et al., 2025). مرور مطالعات انجام‌شده نشان می‌دهد که شکل‌گیری این پدیده حاصل تعامل میان منابع انتشار انسانی، ویژگی‌های کالبدی شهر، شرایط هواشناسی و فرآیندهای انتقال و پراکنش آلاینده‌ها در لایه مرزی شهری است (Ulpiani, 2021; Wu et al., 2024; Di Bernardino et al., 2024). در این پژوهش، جزیره آلودگی شهری به‌صورت عملیاتی به افزایش نسبی غلظت یا ماندگاری آلاینده‌های هوا در محدوده‌های شهری نسبت به مناطق پیرامونی یا غیرشهری اطلاق می‌شود که تحت تأثیر هم‌زمان فعالیت‌های انسانی، ساختار فضایی شهر، شرایط جوی و ظرفیت پراکنش جو شکل می‌گیرد. بر این اساس، UPI نه به‌عنوان یک پدیده کاملاً مستقل و هم‌سطح با UHI، بلکه به‌عنوان یک چارچوب تحلیلی برای بررسی الگوهای فضایی-زمانی آلودگی هوا و ارتباط آن با ویژگی‌های شهری و فرآیندهای اقلیمی مورد استفاده قرار می‌گیرد.

تعریف و ماهیت آلودگی در مقیاس شهری

آلودگی هوا در مقیاس شهری نتیجه برهم‌کنش پیچیده میان شدت انتشار آلاینده‌ها، ویژگی‌های محیط ساخته‌شده و شرایط دینامیکی جو است. در محیط‌های شهری، تمرکز فعالیت‌های انسانی مانند حمل‌ونقل، فعالیت‌های صنعتی، مصرف انرژی ساختمان‌ها و سیستم‌های گرمایشی و سرمایشی، موجب افزایش انتشار آلاینده‌هایی نظیر ذرات معلق ($PM_{2.5}$ و PM_{10})، اکسیدهای نیتروژن (NO_x)، دی‌اکسید گوگرد (SO_2)، مونوکسیدکربن (CO) و ازن سطح زمین (O_3) می‌شود (Seinfeld & Pandis, 2016).

از سوی دیگر، ساختار کالبدی شهر نقش مهمی در کنترل پراکنش آلاینده‌ها دارد. تراکم بالای ساختمان‌ها، ارتفاع بناها، کاهش نسبت فضای باز و شکل‌گیری دره‌های شهری می‌تواند موجب کاهش سرعت باد، محدود شدن تهویه طبیعی و کاهش فرآیند رقیق‌سازی آلاینده‌ها شود. در چنین شرایطی، آلاینده‌های ناشی از ترافیک و فعالیت‌های صنعتی برای مدت طولانی‌تری در نزدیکی سطح زمین باقی می‌مانند و موجب افزایش غلظت آلاینده‌ها در بخش‌های متراکم شهری می‌شوند (Oke, 1988).

برای ارزیابی شدت این پدیده، برخی مطالعات از رویکردی مشابه شدت جزیره گرمایی شهری استفاده کرده‌اند و اختلاف غلظت آلاینده‌ها میان ایستگاه‌های شهری و مناطق مرجع پیرامونی را به‌عنوان شاخصی برای مقایسه شدت تجمع آلاینده‌ها در نظر گرفته‌اند. با این حال، برخلاف شاخص شدت جزیره گرمایی شهری (UHI)، هنوز یک روش محاسباتی استاندارد و مورد توافق جهانی برای تعیین شدت جزیره آلودگی شهری وجود ندارد و مطالعات مختلف بر اساس نوع آلاینده، مقیاس مطالعه و نوع داده‌های مورد استفاده، روش‌های متفاوتی را به کار گرفته‌اند (Ulpiani, 2021). از نظر مفهومی، شکل‌گیری UPI را می‌توان حاصل تعامل چهار عامل اصلی دانست: نخست، منابع انتشار شهری شامل حمل‌ونقل، صنایع و مصرف انرژی؛ دوم، ویژگی‌های مورفولوژیک و کالبدی شهر که بر تهویه و انتقال آلاینده‌ها اثر می‌گذارد؛ سوم، شرایط هواشناختی و ویژگی‌های لایه مرزی شهری که فرآیند اختلاط و پراکنش آلاینده‌ها را کنترل می‌کنند؛ و چهارم، ارتباط متقابل میان آلودگی هوا، گرمایش شهری و مصرف انرژی که موجب ایجاد بازخوردهای پیچیده در سیستم شهری می‌شود (Fernando, 2010; Santamouris, 2015).

تأثیر ویژگی‌های جوی بر کیفیت هوا

کیفیت هوای شهری تا حد زیادی به ظرفیت جو برای انتقال، اختلاط و پراکنده‌سازی آلاینده‌ها وابسته است. در محیط‌های شهری مترکم، شرایط پایدار جوی، کاهش سرعت باد، ارتفاع پایین لایه اختلاط و وقوع وارونگی دما می‌تواند موجب محدود شدن انتقال عمودی آلاینده‌ها و افزایش غلظت آن‌ها در نزدیکی سطح زمین شود (Fernando, 2010). از منظر عملکردی، ویژگی‌های مؤثر بر شکل‌گیری جزیره گرمایی شهری و جزیره آلودگی شهری در بسیاری از موارد مشترک هستند. به‌عنوان مثال، ساختمان‌های بلند، تراکم ساختمانی بالا و سطوح نفوذناپذیر که موجب کاهش اتلاف گرما و تشدید UHI می‌شوند، می‌توانند با محدود کردن جریان هوا و کاهش تهویه طبیعی، شرایط تجمع آلاینده‌ها را نیز فراهم کنند. بنابراین، رابطه میان UHI و UPI را می‌توان حاصل اثرگذاری مشترک ساختار شهری، فعالیت‌های انسانی و فرآیندهای جوی دانست (Cheval et al., 2024). همچنین، تعامل میان این دو پدیده دارای ماهیتی دوسویه است. افزایش دمای شهری می‌تواند با افزایش تقاضای انرژی برای سرمایش، مصرف سوخت و انتشار آلاینده‌ها را افزایش دهد؛ در مقابل، برخی آلاینده‌های جوی نیز از طریق تغییر فرآیندهای تابشی و ویژگی‌های جوی می‌توانند بر شرایط حرارتی شهر اثرگذار باشند (Santamouris, 2015). از این‌رو، بررسی هم‌زمان ویژگی‌های جوی، ساختار شهری و الگوهای انتشار برای درک کامل سازوکارهای شکل‌گیری UPI و ارتباط آن با UHI ضروری است.

۳-۳. تقاضای انرژی شهری

تعریف و مؤلفه‌های تقاضای انرژی در ساختمان

تقاضای انرژی شهری به شدت تحت تأثیر نیازهای گرمایشی و سرمایشی ساختمان‌هاست. در شهرهای دارای UHI قوی، دمای محیط بیرونی بالاتر است و این اختلاف دما با فضای داخلی، نیاز به سرمایش را به‌شدت افزایش می‌دهد (Ahmed et al., 2025). عواملی همچون فرم ساختمان، نفوذپذیری پوسته، و هندسه کلی محله که دسترسی به باد را تنظیم می‌کند، تعیین‌کننده میزان بار سرمایشی هستند.

کارایی سیستم‌های انرژی در بافت شهری

شواهد پژوهشی نشان می‌دهد که راهکارهای مبتنی بر طبیعت مانند افزایش پوشش گیاهی شهری می‌تواند تا ۲۵ درصد از تقاضای انرژی سرمایشی را کاهش دهد (Ahmed et al., 2025). کارایی سیستم‌های انرژی صرفاً به راندمان دستگاه‌های تهویه

وابسته نیست، بلکه به شدت تابعی از شرایط ریزاقلیمی محله است. مدل‌های پیش‌بینی که قادرند اثرات UHI را به‌طور دقیق بر مصرف انرژی ساختمان‌ها اعمال کنند، برای بهینه‌سازی شبکه انرژی شهری در آینده حیاتی هستند (Ni et al., 2025).

۳-۴. ارتباط مفهومی و کارکردی

تعامل UHI و UPI در فرایندهای کالبدی-جوی ریشه دارد. مدل‌های پیش‌بینی‌گر مدرن که از هوش مصنوعی (مانند یادگیری عمیق و مدل‌های ترکیبی) استفاده می‌کنند، در حال تغییر رویکرد ما از مدل‌های سنتی عددی به سمت پیش‌بینی‌های بلادرنگ هستند (Ahmed et al., 2025). چالش مدیریت شهری در مواجهه با UHI و UPI، نیازمند یک رویکرد «هوشمند» است؛ به‌گونه‌ای که مداخلات کالبدی (مانند طراحی مسیرهای باد) و استراتژی‌های کاهش مصرف انرژی به‌صورت یکپارچه مدیریت شوند (Lai et al., n.d.).

۴. روش پژوهش

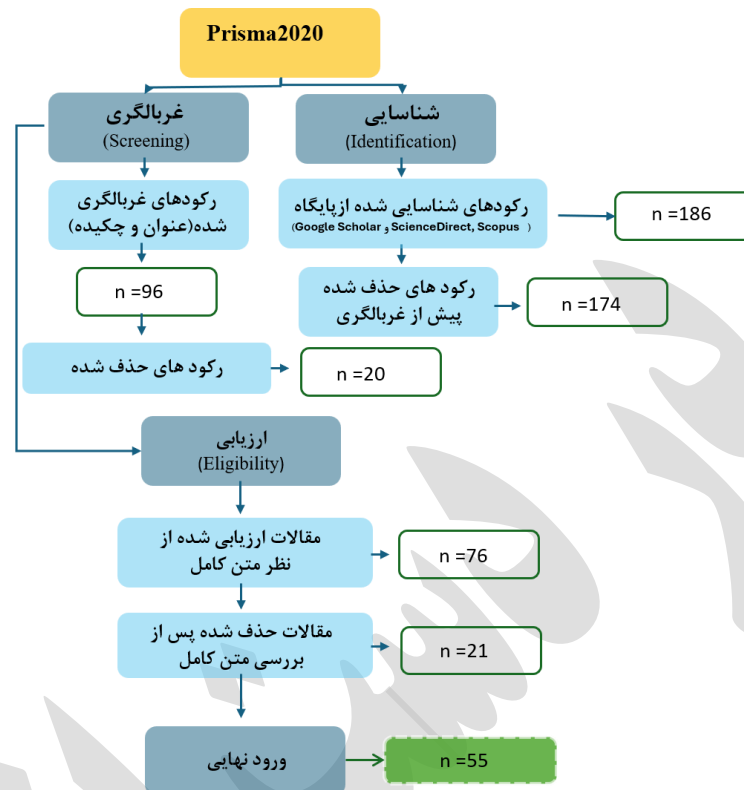
پژوهش حاضر با هدف شناسایی، طبقه‌بندی و تحلیل نظام‌مند مطالعات مرتبط با تعامل میان جزیره گرمایی شهری، جزیره آلودگی شهری و تقاضای انرژی انجام شده است. با توجه به ماهیت میان‌رشته‌ای موضوع، از رویکرد مرور نظام‌مند همراه با تحلیل محتوای کیفی استفاده شد. مرور نظام‌مند برای شناسایی، غربالگری و انتخاب مطالعات معتبر به کار رفت و تحلیل محتوای کیفی برای استخراج مؤلفه‌ها، روش‌ها، الگوهای ارتباطی، روابط مفهومی و مدل‌های پیش‌بینی مورد استفاده قرار گرفت. فرایند تحلیل کیفی با استفاده از نرم‌افزار MAXQDA Analytics Pro 2018 انجام شد.

منابع پژوهش از طریق جست‌وجوی نظام‌مند در پایگاه‌های علمی ScienceDirect، Scopus و Google Scholar گردآوری شدند. جست‌وجو با استفاده از کلیدواژه‌های مرتبط با محورهای اصلی پژوهش، از جمله Urban Pollution Island، Urban Heat Island، Urban Air Quality، Air Pollution، Electricity، Cooling Energy، Building Energy Consumption، Energy Demand، Demand، Urban Climate، Predictive Model و Machine Learning انجام شد. برای ترکیب کلیدواژه‌ها از عملگرهای بولی AND و OR استفاده گردید. بازه زمانی مطالعات مورد بررسی از سال ۲۰۲۰ تا ۲۰۲۶ تعیین شد و تنها منابع انگلیسی‌زبان وارد فرایند غربالگری شدند.

برای انتخاب مطالعات، معیارهای ورود و خروج مشخصی تعریف شد. مطالعاتی وارد تحلیل شدند که به‌صورت مستقیم یا غیرمستقیم با یکی از محورهای جزیره گرمایی شهری، جزیره آلودگی شهری، آلودگی هوا، کیفیت هوای شهری، تقاضای انرژی، مصرف انرژی ساختمان، بار سرمایشی، یا مدل‌های پیش‌بینی مرتبط بودند. همچنین، مطالعات باید دارای روش علمی مشخص، داده‌های تجربی، مدل‌سازی، تحلیل آماری، یا چارچوب نظری قابل ارزیابی و متن کامل قابل دسترسی می‌بودند. در مقابل، منابع تکراری، مطالعات فاقد ارتباط موضوعی، منابع بدون متن کامل، مقالات غیرعلمی و مطالعاتی که ارتباط روشنی با محورهای اصلی پژوهش نداشتند، از تحلیل حذف شدند.

فرایند غربالگری مطالعات با الهام از چارچوب PRISMA انجام شد. در مرحله نخست، ۱۸۶ منبع از پایگاه‌های علمی شناسایی شد. پس از حذف منابع تکراری، تعداد منابع به ۱۷۴ مورد کاهش یافت. در مرحله بعد، عنوان و چکیده منابع بررسی شد و پس از حذف مطالعات نامرتب، ۹۶ مقاله برای ارزیابی متن کامل باقی ماند. در مرحله ارزیابی متن کامل، مقالات از نظر میزان ارتباط با محورهای جزیره گرمایی شهری، جزیره آلودگی شهری، تقاضای انرژی، روش‌های تحلیلی و مدل‌های پیش‌بینی بررسی شدند.

در نهایت، ۵۵ مقاله معیارهای ورود به پژوهش را دارا بودند و به عنوان جامعه نهایی تحلیل انتخاب شدند. فرایند شناسایی، غربالگری و انتخاب مطالعات در نمودار PRISMA در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل ۱: نمودار PRISMA2020 پژوهش

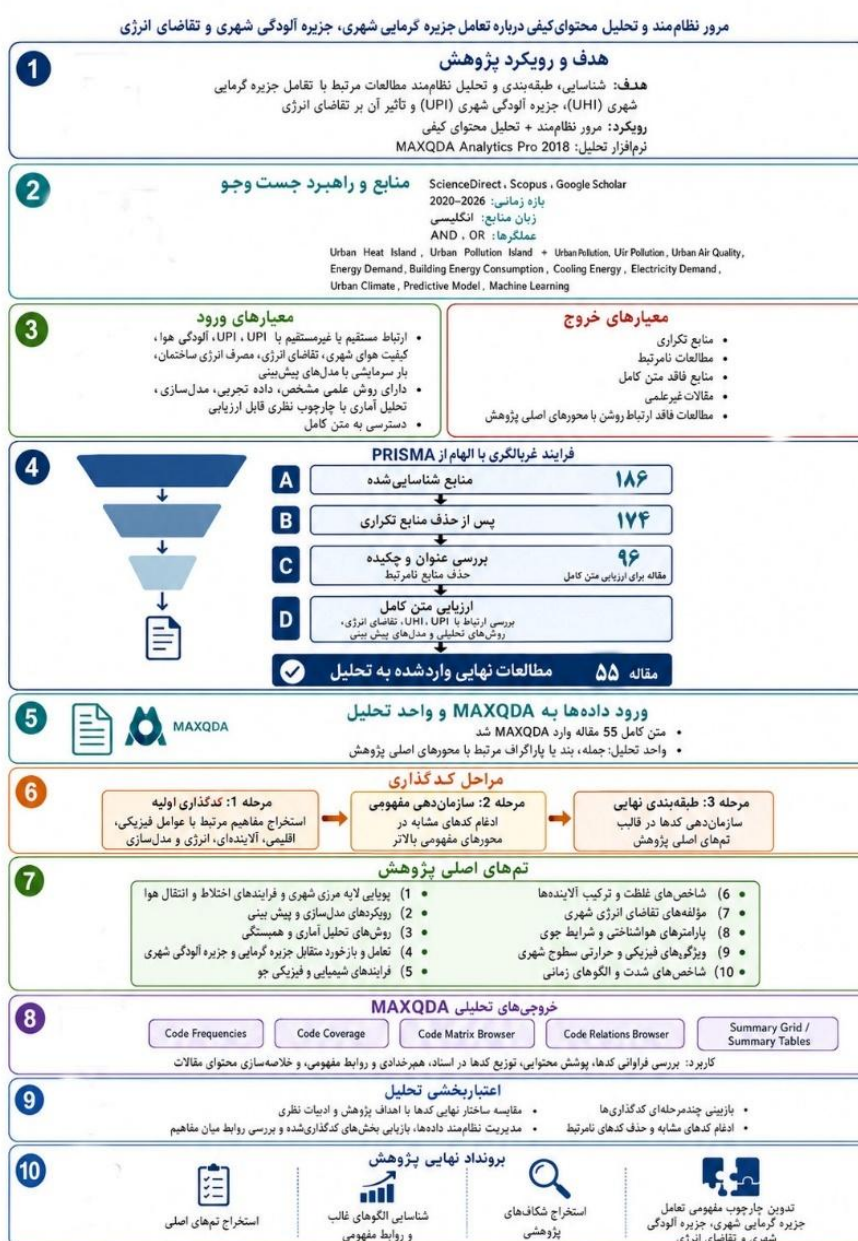
پس از انتخاب مطالعات نهایی، متن کامل ۵۵ مقاله وارد نرم افزار MAXQDA شد. واحد تحلیل در این پژوهش، جمله، بند یا پاراگرافهایی بود که به یکی از محورهای اصلی پژوهش اشاره داشتند. فرایند کدگذاری در سه مرحله انجام شد. در مرحله نخست، کدگذاری اولیه برای استخراج مفاهیم مرتبط با عوامل فیزیکی، اقلیمی، آلاینده‌ای، انرژی و مدل‌سازی انجام گرفت. در مرحله دوم، کدهای مشابه و هم‌پوشان بازبینی و در قالب محورهای مفهومی بالاتر سازمان‌دهی شدند. در مرحله سوم، کدهای نهایی در قالب تم‌های اصلی پژوهش طبقه‌بندی شدند.

بر اساس تحلیل انجام‌شده، تم‌های اصلی پژوهش شامل پویایی لایه مرزی شهری و فرایندهای اختلاط و انتقال هوا، رویکردهای مدل‌سازی و پیش‌بینی، روش‌های تحلیل آماری و همبستگی، تعامل و بازخورد متقابل جزیره گرمایی و جزیره آلودگی شهری، فرایندهای شیمیایی و فیزیکی جو، شاخص‌های غلظت و ترکیب آلاینده‌ها، مؤلفه‌های تقاضای انرژی شهری، پارامترهای هواشناسی و شرایط جوی، ویژگی‌های فیزیکی و حرارتی سطوح شهری، و شاخص‌های شدت و الگوهای زمانی - مکانی جزیره گرمایی شهری بودند.

برای استخراج و تحلیل یافته‌ها از خروجی‌های مختلف نرم‌افزار MAXQDA استفاده شد. خروجی Code Frequencies برای بررسی فراوانی کدها، Code Coverage برای تحلیل میزان پوشش محتوایی هر کد، Code Matrix Browser برای بررسی توزیع کدها در میان اسناد، Code Relations Browser برای تحلیل روابط و هم‌رخدادی کدها، و Summary و Summary Grid

Tables برای خلاصه‌سازی محتوای مقالات به کار رفتند. استفاده از این خروجی‌ها امکان شناسایی محورهای غالب، روابط مفهومی، الگوهای تکرارشونده و شکاف‌های پژوهشی را فراهم کرد.

برای افزایش اعتبار تحلیل، فرایند کدگذاری در چند مرحله بازبینی شد. کدهای مشابه ادغام و کدهای نامرتب حذف شدند. همچنین، ساختار نهایی کدها با اهداف پژوهش، پرسش اصلی تحقیق و ادبیات نظری مقایسه شد تا انسجام مفهومی و روش‌شناختی تحلیل حفظ شود. استفاده از MAXQDA امکان مدیریت نظام‌مند داده‌ها، بازبانی بخش‌های کدگذاری‌شده، بررسی توزیع کدها و تحلیل روابط میان مفاهیم را فراهم کرد. در نهایت، یافته‌ها در قالب تم‌های اصلی، روابط میان مؤلفه‌ها و چارچوب مفهومی تعامل جزیره گرمایی شهری، جزیره آلودگی شهری و تقاضای انرژی تحلیل شدند. دیاگرام کلی روش پژوهش در شکل ۲ ارائه شده است.



شکل ۲: دیاگرام روش پژوهش

۵. یافته‌های پژوهش

در این بخش، نتایج حاصل از تحلیل محتوای نظام‌مند مطالعات منتخب ارائه می‌شود. پس از غربالگری و انتخاب منابع مرتبط با تعامل جزیره گرمایی شهری، جزیره آلودگی شهری و تقاضای انرژی، مفاهیم کلیدی استخراج‌شده از مقالات در محیط نرم‌افزار MAXQDA کدگذاری شدند. در مجموع، ۴,۰۶۰ بخش‌های کدگذاری‌شده ارجاع کدگذاری‌شده از مطالعات منتخب استخراج شد. این بخش‌های کدگذاری‌شده پس از بازبینی مفهومی، حذف همپوشانی‌ها و تجمیع کدهای مشابه، در قالب ۱۰ کد اصلی سازمان‌دهی شدند. تحلیل یافته‌ها در سه سطح انجام گرفت. نخست، توزیع فراوانی کدهای اصلی بررسی شد تا محورهای غالب در ادبیات شناسایی شوند. دوم، ماتریس نویسندگان-کدها برای بررسی میزان تمرکز مطالعات منتخب بر محورهای موضوعی مختلف تحلیل شد. سوم، روابط هم‌رخدادی میان کدهای اصلی بررسی شد تا پیوندهای مفهومی میان UHI، UPI و تقاضای انرژی شناسایی شود. بر این اساس، بخش یافته‌ها شامل توزیع فراوانی کدها، الگوی تمرکز مطالعات، تحلیل هم‌رخدادی و سنتز مفهومی یافته‌هاست. جدول ۱، ماتریس ارتباط نویسندگان و کدهای اصلی استخراج‌شده را نشان می‌دهد و مبنای شکل‌گیری چارچوب تحلیلی این مطالعه است. در گام نخست، مجموعاً ۴,۰۶۰ قطعه کدگذاری‌شده از میان مطالعات منتخب استخراج شد. از آنجا که بسیاری از بخش‌های کدگذاری‌شده از نظر مفهومی همپوشانی داشتند، برای جلوگیری از پراکندگی معنا و حفظ انسجام تحلیلی، این واحدها در چند مرحله ادغام شدند و در نهایت ۱۰ کد اصلی (Parent Codes) به‌دست آمد. بنابراین، اعداد درج‌شده در جدول صرفاً فراوانی خام نیستند، بلکه بازتاب‌دهنده تراکم مفهومی هر محور در بدنه ادبیات بررسی‌شده‌اند.

مطالعاتی مانند دی برناردینو و همکاران (۲۰۲۶) و آذرگشایی و همکاران (۲۰۲۵) به‌دلیل پوشش هم‌زمان محورهایی مانند تعامل UHI-UPI، پارامترهای هواشناختی، مدل‌سازی و فرایندهای جوی، نقش مهمی در شکل‌گیری چارچوب مفهومی پژوهش دارند. این مطالعات نمونه‌هایی از رویکردهای چندبعدی در ادبیات محسوب می‌شوند، زیرا تلاش کرده‌اند رابطه میان گرمایش شهری، آلودگی هوا، شرایط جوی و پیامدهای انرژی را در قالبی نسبتاً یکپارچه بررسی کنند. در مقابل، مطالعاتی مانند معروفی‌آذر و همکاران (۲۰۲۶)، اسنایی و مرابتین (۲۰۲۵)، چوا و همکاران (۲۰۲۴) بیشتر نماینده گرایش مدل‌محور ادبیات هستند. این مطالعات در کدهای مرتبط با مدل‌سازی، پیش‌بینی، تحلیل آماری و انرژی فراوانی بالاتری نشان می‌دهند و بیانگر آن هستند که بخش مهمی از ادبیات موجود به‌دنبال شبیه‌سازی، پیش‌بینی و کمی‌سازی اثرات UHI بر مصرف انرژی و شرایط اقلیمی شهری است. همچنین، مطالعاتی مانند معروفی‌آذر و همکاران (۲۰۲۶)، چوا و همکاران (۲۰۲۴) و ونتورا و همکاران (۲۰۲۶) بیشتر بر ویژگی‌های فیزیکی و حرارتی سطوح شهری، شدت و الگوهای زمانی-مکانی UHI و پارامترهای هواشناختی تمرکز دارند. این گروه از مطالعات در تبیین نقش مصالح، آلوده، پوشش گیاهی، زبری سطح، نفوذناپذیری و شرایط اقلیمی محلی در شکل‌گیری یا تشدید UHI اهمیت دارند. در مجموع، تحلیل ماتریس نویسندگان-کدها نشان می‌دهد که ادبیات موجود از یک سو به‌شدت متکی بر مدل‌سازی و تحلیل کمی است و از سوی دیگر، مطالعاتی که پیوند میان سطح شهری، اقلیم محلی، آلودگی هوا و تقاضای انرژی را به‌صورت یکپارچه بررسی کنند، هنوز محدودتر هستند.

جدول ۱: ماتریس ارتباط مطالعات منتخب با کدهای اصلی استخراج‌شده از تحلیل MAXQDA

شدت و الگوهای زمانی-مکانی UHI	ویژگی‌ها ی سطح شهری	پارامترهای هواشناختی	تقاضای انرژی	غلظت و ترکیب آلاینده‌ها	فرایندهای شیمیایی و فیزیکی	تعامل UHI - UPI	تحلیل آماري و همبستگی	مدل‌سازی و پیش‌بینی	پویایی لايه مرزی	
۹	۶	۱۲	۱۰	۹	۴	۹	۷	۷	۰	A. Di Bernardino et al.2026

شدت و الگوهای زمانی-مکانی UHI	ویژگی‌ها ی سطح شهری	پارامترهای هواشنماختی	تقاضای انرژی	غلظت و ترکیب آلاینده‌ها	فرایندهای شیمیایی و فیزیکی	تعامل UHI - UPI	تحلیل آماري و همبستگی	مدل‌سازی و پیش‌بینی	پویایی لايه مرزی	
A. Lefevre et al.2025	۱۲	۱۳	۸	۰	۰	۰	۰	۱۰	۴	۵
Abdul Aziz et al.2024	۰	۱۰	۱۱	۰	۰	۰	۱	۸	۰	۰
Abhiraj Tiwari et al.2026	۰	۷	۰	۰	۰	۰	۰	۲	۰	۰
Ahmed Marey et al.2025	۷	۷	۷	۰	۰	۰	۰	۲۰	۰	۷
Ali Akbar Rezazadeh et al.2025	۰	۵	۹	۵	۰	۴	۰	۱۳	۰	۳
Ali Aslani et al.2025	۲۲	۵	۵	۲	۴	۵	۴	۹	۰	۹
Ali Heydari et al.	۲۳	۶	۵	۰	۳	۴	۴	۱۲	۲	۹
Ali Majnoon et al.2025	۰	۵	۱۱	۰	۰	۴	۸	۳۶	۰	۶
Ali Najah Ahmed et al.2025	۷	۲	۶	۰	۰	۴	۶	۱۰	۰	۳
Alireza Attarhay Tehrani et al.2025	۵	۴	۸	۰	۱	۲	۰	۷	۰	۳
Alireza Karimi et al.2026	۱۴	۲	۱۱	۰	۰	۴	۳	۲۲	۰	۱۲
Amina Salhi et al.2025	۱	۰	۱۶	۰	۰	۱۵	۱۴	۷۵	۰	۳
Amnuaylojar oen 2025	۰	۱۱	۰	۰	۰	۲۰	۶	۴۴	۰	۶
Baoling Gui et al.2025	۲۶	۰	۵	۰	۰	۲۵	۱۸	۲۵	۰	۳
Byeongseong Choia et al.2026	۳	۱	۳۰	۰	۰	۰	۸	۵۱	۰	۱۱
Darvishvand et al.2025	۱	۲	۴۴	۱	۰	۲	۱۴	۳۳	۰	۱
Delgado-Enales et al.2025	۱۸	۶	۱۴	۲	۱	۱۰	۹	۱۸	۱	۱۲
Elda Cina et al.2025	۸	۲	۱۸	۱	۲	۲	۲	۸	۰	۳
Elham Bahadori et al.2025	۱۴	۳	۱۱	۱	۳	۶	۲	۲۴	۰	۷
Farzad Hashemi et al.2025	۷	۷	۱۱	۰	۱	۲	۵	۲۵	۱	۷
Fei Zhao et al.2025	۱۱	۵	۸	۰	۱	۱	۴	۲۸	۱	۱۱
Fiona Federer et al.2026	۱۰	۱۰	۰	۰	۳	۱۳	۳	۱۲	۳	۱۱
Forood Azargoshasbi et al.2025	۹	۹	۱۲	۰	۶	۳۶	۰	۱۸	۱	۱۴
Gashaw T. Mekonnen et al.2025	۱۴	۰	۷	۱	۰	۷	۳	۹	۰	۱۵
Giuseppe Aruta et al.2025	۱۱	۹	۱۵	۰	۳	۲	۲	۲۳	۰	۱۱
Hongwei Liu et al.2026	۱	۶	۸	۴	۱	۳	۴	۱۸	۰	۵
Iñigo Delgado-	۱۷	۸	۱۳	۱	۱	۳	۳	۴۵	۲	۱۳

شدت و الگوهای زمانی-مکانی UHI	ویژگی‌ها ی سطح شهری	پارامترهای هواشناختی	تقاضای انرژی	غلظت و ترکیب آلاینده‌ها	فرایندهای شیمیایی و فیزیکی	تعامل UHI - UPI	تحلیل آماري و همبستگی	مدل‌سازی و پیش‌بینی	پویایی لایه مرزی	
Enale et al.2025										
Ilkim Canli Akyol et al.2025	۳	۲	۱۰	۵۲	۱	۱	۲	۳۱	۰	
J. Litardo et al.2020	۱۰	۲۷	۸	۱۲	۱	۲	۰	۵	۳	
Jia Siqu, Wang Yuhong2020	۱۸	۱۸	۶	۲	۰	۵	۱	۷	۱	
Jin Rui et al.2026	۱۶	۱۲	۶	۶	۰	۰	۱	۲۶	۰	
José-Alberto Solís-Villarreal et al.2024	۳	۵	۵	۲۸	۰	۰	۳	۲۰	۰	
Lidia Vitanova et al.2025	۱۲	۲۵	۱۰	۱۵	۰	۰	۳	۱۶	۲	
Loïc Frayssinet et al.2018	۷	۲۰	۶	۴۱	۰	۵	۴	۲۰	۵	
Manan Singh & Ryan Sharston.2022	۹	۵	۱۱	۱۸	۱	۰	۶	۵	۰	
Meng Zhang , Zhihui Li et al.2025	۲	۱	۷	۰	۰	۵	۰	۲۴	۰	
Muhammad Ehtsham et al.2025	۴	۰	۱۴	۱۹	۱	۱	۲	۶۱	۰	
Muhammad Khalid Anser et al.2025	۷	۳۱	۷	۹	۲	۱	۴	۱	۱	
Naga Venkata Sai Kumar Manapragada et al.2025	۳	۱۱	۳	۸	۰	۱	۳	۲۷	۰	
Pengyuan Shen2025	۷	۱۰	۶	۱۰	۰	۳	۵	۲۵	۰	
Rasool Maroofiazar et al.2026	۲۰	۳۳	۷	۱۶	۱	۱	۱	۲۳	۱	
Reda Snaiki&, Abdelatif Merabtine.2025	۱۱	۳	۶	۴	۱	۲	۷	۶۵	۱	
Sarowar Morshed Shawon et al.2025	۲	۰	۱۰	۴۲	۰	۱	۳	۳۶	۰	
Sergi Ventura et al.2026	۲۵	۲۴	۲۰	۰	۱	۱	۱۲	۱۵	۲	
Sheng Liu et al.2025	۲۰	۲۵	۵	۲۶	۰	۳	۳	۰	۰	
Soheil Fathi et al.2020	۳	۳	۴	۴۹	۰	۱	۲	۱۸	۰	
Sorin Cheva et al.2024	۲۴	۳۰	۲۲	۱	۰	۳	۲	۱۶	۳	
Xiufeng Liu et al.2026	۰	۰	۰	۲۸	۰	۰	۰	۶	۰	
Xueli Ni et al.2025	۲۲	۲۴	۱۳	۱	۱	۳	۳	۱۵	۱	
Yiwen Zhu et al.2026	۱۸	۴۰	۱	۰	۰	۲	۵	۱۳	۰	

شدت و الگوهای زمانی-مکانی UHI	ویژگی‌ها ی سطح شهری	پارامترهای هواشناختی	تقاضای انرژی	غلظت و ترکیب آلاینده‌ها	فرایندهای شیمیایی و فیزیکی	تعامل UHI - UPI	تحلیل آماري و همبستگی	مدل‌سازی و پیش‌بینی	پویایی لایه مرزی	
Yu Chen et al.2025	۰	۲	۰	۰	۰	۳۹	۱	۴۲	۰	
Yuan Lai et al.2024	۵	۵	۱۲	۰	۰	۱۴	۰	۲۱	۰	
Zhiwei Xie et al.2025	۱۱	۰	۱۱	۰	۰	۰	۶	۲۸	۰	
Zhiyuan Zhang et al.2026	۲	۳	۱۰	۵	۰	۴	۴	۲۷	۱۰	

جدول ۲ توزیع فراوانی و درصد فراوانی ۱۰ کد اصلی پژوهش را نشان می‌دهد. بر اساس نتایج، کد «رویکردهای مدل‌سازی و پیش‌بینی متغیرهای اقلیمی و آلودگی شهری» با ۱,۲۰۵ ارجاع، معادل ۲۹/۶۸ درصد، بیشترین فراوانی را به خود اختصاص داده است. پس از آن، کد «مؤلفه‌های تقاضای انرژی شهری متأثر از دما و UHI» با ۷۲۶ ارجاع، معادل ۱۷/۸۸ درصد، و کد «ویژگی‌های فیزیکی و حرارتی سطوح شهری مؤثر بر تشکیل UHI» با ۶۱۶ ارجاع، معادل ۱۵/۱۷ درصد، در رتبه‌های بعدی قرار دارند. همچنین، کدهای «شاخص‌های شدت و الگوهای زمانی-مکانی جزیره گرمایی شهری» با ۴۵۵ ارجاع، معادل ۱۱/۲۱ درصد، و «پارامترهای هواشناختی و شرایط جوی مؤثر بر UHI و آلودگی هوا» با ۳۵۳ ارجاع، معادل ۸/۶۹ درصد، سهم قابل توجهی از ادبیات مورد بررسی را تشکیل می‌دهند. این الگو نشان می‌دهد که بخش مهمی از مطالعات بر مدل‌سازی، پیش‌بینی، شدت UHI، ویژگی‌های سطح شهری و پیامدهای انرژی محور تمرکز داشته‌اند. در مقابل، کدهای مرتبط با سازوکارهای فرایندی و آلودگی شهری سهم کمتری دارند. کد «تعامل و بازخورد متقابل جزیره گرمایی شهری و آلودگی هوا» با ۳۱۲ ارجاع، معادل ۷/۶۸ درصد، و کد «روش‌های تحلیل آماری و همبستگی در مطالعات UHI و آلودگی» با ۲۳۱ ارجاع، معادل ۵/۶۹ درصد، در سطح میانی قرار دارند. در پایین‌ترین سطح فراوانی، کدهای «فرایندهای شیمیایی و فیزیکی جو در شرایط گرمایش شهری» با ۷۵ ارجاع، معادل ۱/۸۵ درصد، «پویایی لایه مرزی شهری و فرایندهای اختلاط و انتقال هوا» با ۴۵ ارجاع، معادل ۱/۱۱ درصد، و «شاخص‌های غلظت و ترکیب آلاینده‌های هوا در جزیره آلودگی شهری» با ۴۲ ارجاع، معادل ۱/۰۳ درصد، قرار دارند. این توزیع نشان می‌دهد که ادبیات موجود بیشتر بر رویکردهای مدل محور، تحلیل شدت UHI، ویژگی‌های سطح شهری و پیامدهای انرژی تمرکز دارد، در حالی که سازوکارهای فیزیکی-شیمیایی جو، پویایی لایه مرزی و شاخص‌های دقیق UPI کمتر مورد توجه قرار گرفته‌اند.

جدول ۲: فراوانی و درصد فراوانی کدهای اصلی پژوهش

کدهای اصلی پژوهش	فراوانی	درصد فراوانی
رویکردهای مدل‌سازی و پیش‌بینی متغیرهای اقلیمی و آلودگی شهری	۱۲۰۵	۲۹/۶۸
مؤلفه‌های تقاضای انرژی شهری متأثر از دما و UHI	۷۲۶	۱۷/۸۸
ویژگی‌های فیزیکی و حرارتی سطوح شهری مؤثر بر تشکیل UHI	۶۱۶	۱۵/۱۷
شاخص‌های شدت و الگوهای زمانی-مکانی جزیره گرمایی شهری	۴۵۵	۱۱/۲۱
پارامترهای هواشناختی و شرایط جوی مؤثر بر UHI و آلودگی هوا	۳۵۳	۸/۶۹
تعامل و بازخورد متقابل جزیره گرمایی شهری و آلودگی هوا	۳۱۲	۷/۶۸
روش‌های تحلیل آماری و همبستگی در مطالعات UHI و آلودگی	۲۳۱	۵/۶۹
فرایندهای شیمیایی و فیزیکی جو در شرایط گرمایش شهری	۷۵	۱/۸۵
پویایی لایه مرزی شهری و فرایندهای اختلاط و انتقال هوا	۴۵	۱/۱۱

۱/۰۳	۴۲	شاخص‌های غلظت و ترکیب آلاینده‌های هوا در جزیره آلودگی شهری (UPI)
۱۰۰.۰۰	۴۰۶۰	مجموع

۴-۱. تحلیل هم‌رخدادی کدهای اصلی

پس از تحلیل فراوانی کدها، تحلیل هم‌رخدادی میان کدهای اصلی انجام شد تا مشخص شود مفاهیم محوری استخراج شده از مطالعات منتخب چگونه در کنار یکدیگر ظاهر شده‌اند و چه نوع پیوندهای مفهومی میان آن‌ها قابل شناسایی است. در حالی که تحلیل فراوانی نشان می‌دهد هر کد تا چه اندازه در مجموعه داده‌ها تکرار شده است، تحلیل هم‌رخدادی امکان بررسی ساختار رابطه‌ای میان کدها را فراهم می‌کند. بنابراین، این تحلیل برای شناسایی محورهای اتصال‌دهنده میان جزیره گرمایی شهری، جزیره آلودگی شهری و تقاضای انرژی به‌کار گرفته شد. در این مرحله، ماتریس هم‌رخدادی کدهای اصلی با استفاده از خروجی Code Relations Browser در نرم‌افزار MAXQDA استخراج شد. در شکل ۳ ماتریس رنگی هم‌رخدادی کدهای اصلی پژوهش بر اساس خروجی Code Relations Browser در MAXQDA بیان شده است.

شکل ۳: ماتریس رنگی هم‌رخدادی کدهای اصلی پژوهش بر اساس خروجی Code Relations Browser در MAXQDA

شدت UHI	ویژگی‌ها ی سطح	هواش ناسی	تقاضای انرژی	شاخص‌ها ی UPI	شیم ی جو	تعامل UHI-UPI	تحلیل آماري	مدل سازی	لایه مرزی	Code System
۰	۲	۱	۰	۰	۲	۰	۰	۱	۰	لایه مرزی
۲	۰	۱	۲	۰	۰	۰	۱	۰	۱	مدل‌سازی
۰	۲	۰	۱	۰	۰	۰	۰	۱	۰	تحلیل آماري
۰	۰	۱	۶	۰	۰	۰	۰	۰	۰	تعامل UHI-UPI
۰	۰	۱	۱	۰	۰	۰	۰	۰	۲	شیمی جو
۰	۰	۰	۱	۰	۰	۰	۰	۰	۰	شاخص‌ها ی UPI
۱	۰	۰	۰	۱	۱	۶	۱	۲	۰	تقاضای انرژی
۴	۰	۰	۰	۰	۱	۱	۱	۱	۱	هواشناسی
۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۲	۰	۲	ویژگی‌های سطح
۰	۰	۴	۱	۰	۰	۰	۰	۲	۰	شدت UHI

از آنجا که ماتریس هم‌رخدادی ماهیتی متقارن دارد، روابط تکراری در دو سوی قطر اصلی تنها یک‌بار در تحلیل لحاظ شدند. همچنین مقادیر قطر اصلی ماتریس، که نشان‌دهنده هم‌رخدادی هر کد با خودش است، از تحلیل حذف شد. در این تحلیل، مقادیر هم‌رخدادی به‌عنوان شاخصی از شدت نسبی پیوند مفهومی میان کدها تفسیر شدند، نه به‌عنوان رابطه علی یا آماری.

مستقیم. بنابراین، مقادیر ارائه شده نشان می دهند که دو مفهوم تا چه اندازه در زمینه های تحلیلی مشترک ظاهر شده اند. جدول ۳، ده رابطه منتخب هم‌رخدادی میان کدهای اصلی را نشان می دهد.

جدول ۳: ده رابطه منتخب هم‌رخدادی میان کدهای اصلی بر اساس خروجی Code Relations Browser در MAXQDA

ردیف	جفت کدهای هم‌رخدادی	مقدار هم‌رخدادی	سطح رابطه	تفسیر تحلیلی
۱	تعامل و بازخورد متقابل جزیره گرمایی شهری و آلودگی هوا × مؤلفه های تقاضای انرژی شهری متأثر از دما و UHI	۶	قوی	نشان می دهد که پیوند میان UHI و UPI در ادبیات مورد بررسی عمدتاً در ارتباط با پیامدهای انرژی محور، به ویژه افزایش بار سرمایشی، تغییر الگوی مصرف برق و تشدید تقاضای انرژی شهری، مطرح شده است.
۲	پارامترهای هواشناسی و شرایط جوی مؤثر بر UHI و آلودگی هوا × شاخص های شدت و الگوهای زمانی- مکانی جزیره گرمایی شهری	۴	نسبتاً قوی	بیانگر نقش شرایط جوی مانند دما، سرعت باد، رطوبت، تابش خورشیدی و پایداری جو در کنترل شدت و تغییرپذیری زمانی- مکانی UHI است.
۳	پویایی لایه مرزی شهری و فرایندهای اختلاط و انتقال هوا × فرایندهای شیمیایی و فیزیکی جو در شرایط گرمایش شهری	۲	متوسط	نشان دهنده ارتباط میان اختلاط عمودی، انتقال هوا و فرایندهای شیمیایی و فیزیکی مؤثر بر رفتار آلاینده ها در محیط شهری است.
۴	پویایی لایه مرزی شهری و فرایندهای اختلاط و انتقال هوا × ویژگی های فیزیکی و حرارتی سطوح شهری مؤثر بر تشکیل UHI	۲	متوسط	بیانگر آن است که ویژگی های کالبدی و حرارتی سطوح شهری می توانند از طریق تأثیر بر آشفستگی، تهویه و اختلاط هوا در شکل گیری شرایط حرارتی و آلودگی شهری نقش داشته باشند.
۵	رویکردهای مدل سازی و پیش بینی متغیرهای اقلیمی و آلودگی شهری × مؤلفه های تقاضای انرژی شهری متأثر از دما و UHI	۲	متوسط	نشان می دهد که بخشی از مطالعات از مدل سازی و پیش بینی برای برآورد اثر UHI بر مصرف انرژی، بار سرمایشی و نیازهای انرژی شهری استفاده کرده اند.
۶	رویکردهای مدل سازی و پیش بینی متغیرهای اقلیمی و آلودگی شهری × شاخص های شدت و الگوهای زمانی- مکانی جزیره گرمایی شهری	۲	متوسط	بیانگر نقش مدل سازی در شبیه سازی، پیش بینی و تحلیل شدت، توزیع مکانی و تغییرات زمانی UHI است.
۷	روش های تحلیل آماری و همبستگی در مطالعات UHI و آلودگی × ویژگی های فیزیکی و حرارتی سطوح شهری مؤثر بر تشکیل UHI	۲	متوسط	نشان می دهد که بخشی از مطالعات از تحلیل های آماری و همبستگی برای سنجش رابطه میان ویژگی های سطحی شهر و شکل گیری یا تشدید UHI استفاده کرده اند.
۸	پویایی لایه مرزی شهری و فرایندهای اختلاط و انتقال هوا × رویکردهای مدل سازی و پیش بینی متغیرهای اقلیمی و آلودگی شهری	۱	ضعیف	نشان دهنده توجه محدود اما موجود به استفاده از مدل سازی برای بررسی فرایندهای اختلاط، انتقال هوا و پویایی لایه مرزی شهری است.

ردیف	جفت کدهای هم‌رخداد	مقدار هم‌رخدادی	سطح رابطه	تفسیر تحلیلی
۹	شاخص‌های غلظت و ترکیب آلاینده‌های هوا در جزیره آلودگی شهری × مؤلفه‌های تقاضای انرژی شهری متأثر از دما و UHI	۱	ضعیف	بیانگر آن است که رابطه مستقیم میان شاخص‌های آلودگی شهری و تقاضای انرژی در ادبیات مورد بررسی هنوز کم‌رنگ و محدود است.
۱۰	پارامترهای هواشناسی و شرایط جوی مؤثر بر UHI و آلودگی هوا × تعامل و بازخورد متقابل جزیره گرمایی شهری و آلودگی هوا	۱	ضعیف	نشان می‌دهد که برخی مطالعات به نقش شرایط جوی در تعدیل یا تشدید رابطه میان گرمایش شهری و آلودگی هوا توجه کرده‌اند، اما این پیوند هنوز به صورت گسترده توسعه نیافته است.

نتایج جدول ۳ نشان می‌دهد که قوی‌ترین رابطه هم‌رخدادی میان «تعامل و بازخورد متقابل جزیره گرمایی شهری و آلودگی هوا» و «مؤلفه‌های تقاضای انرژی شهری متأثر از دما» و UHI مشاهده شده است. مقدار هم‌رخدادی این دو کد برابر با ۶ است که بالاترین مقدار در میان روابط استخراج‌شده محسوب می‌شود. این یافته نشان می‌دهد که در ادبیات مورد بررسی، تعامل میان UHI و UPI غالباً در ارتباط با پیامدهای انرژی‌محور تفسیر شده است. به بیان دیگر، افزایش دمای شهری و تشدید شرایط گرمایی در بسیاری از مطالعات در پیوند با افزایش بار سرمایشی، تغییر الگوی مصرف برق و تشدید تقاضای انرژی شهری مطرح شده است. بر این اساس، تقاضای انرژی را می‌توان در شبکه مفهومی این پژوهش به عنوان یک مفهوم واسطه تفسیر کرد که گرمایش شهری، آلودگی هوا و پیامدهای عملکردی شهر را در ادبیات مورد بررسی به یکدیگر پیوند می‌دهد. این یافته اهمیت انرژی را نه تنها به عنوان پیامد UHI، بلکه به عنوان یکی از محورهای اتصال‌دهنده میان UHI، UPI و سیاست‌گذاری شهری برجسته می‌سازد.

دومین رابطه برجسته مربوط به هم‌رخدادی میان «پارامترهای هواشناسی و شرایط جوی مؤثر بر UHI و آلودگی هوا» و «شاخص‌های شدت و الگوهای زمانی-مکانی جزیره گرمایی شهری» است. مقدار هم‌رخدادی این رابطه برابر با ۴ است. این رابطه نشان می‌دهد که در بخش قابل توجهی از مطالعات، شدت و تغییرپذیری زمانی-مکانی UHI در پیوند نزدیک با شرایط جوی تحلیل شده است. متغیرهایی مانند دما، سرعت باد، رطوبت نسبی، تابش خورشیدی، پایداری جو و شرایط فصلی می‌توانند در تفسیر شدت، تداوم و توزیع مکانی جزیره گرمایی شهری نقش داشته باشند. در سطح روابط متوسط، چند پیوند مهم با مقدار هم‌رخدادی ۲ مشاهده می‌شود. از جمله، رابطه میان «پویایی لایه مرزی شهری و فرایندهای اختلاط و انتقال هوا» با «فرایندهای شیمیایی و فیزیکی جو در شرایط گرمایش شهری» نشان می‌دهد که برخی مطالعات به سازوکارهای فیزیکی و شیمیایی مؤثر بر انتقال، اختلاط و تغییر رفتار آلاینده‌ها در محیط شهری توجه کرده‌اند. همچنین، هم‌رخدادی میان پویایی لایه مرزی شهری و ویژگی‌های فیزیکی و حرارتی سطوح شهری بیانگر آن است که ویژگی‌هایی مانند مصالح، آلودگی، زبری سطح، نفوذناپذیری و پوشش گیاهی می‌توانند از طریق اثرگذاری بر آشفستگی، تهویه و تبادل حرارتی، بر شرایط لایه مرزی شهری اثر بگذارند.

با این حال، پایین بودن مقدار هم‌رخدادی این روابط در مقایسه با محور انرژی نشان می‌دهد که فرایندهای لایه مرزی و شیمی جو هنوز جایگاه کم‌رنگ‌تری در ادبیات مورد بررسی دارند. همچنین روابط هم‌رخدادی میان «رویکردهای مدل‌سازی و پیش‌بینی» با «تقاضای انرژی شهری» و «شاخص‌های شدت UHI» نشان می‌دهد که مدل‌سازی یکی از ابزارهای مهم برای تحلیل و پیش‌بینی پیامدهای گرمایش شهری است. این یافته با نتایج تحلیل فراوانی نیز هم‌خوانی دارد، زیرا کد مربوط به مدل‌سازی و پیش‌بینی پرتکرارترین کد در مجموعه داده‌ها بود. با وجود این، تحلیل هم‌رخدادی نشان می‌دهد که در مجموعه

مطالعات بررسی شده، مدل سازی بیشتر در ارتباط با پیش بینی شدت UHI و تقاضای انرژی ظاهر شده و کمتر به صورت یکپارچه برای تحلیل هم زمان UHI، UPI، فرایندهای شیمیایی جو و پویایی لایه مرزی به کار رفته است. از سوی دیگر، مقدار هم رخدادی بسیار پایین کد «شاخص های غلظت و ترکیب آلاینده های هوا در جزیره آلودگی شهری» با سایر کدها نشان می دهد که شاخص های UPI در مقایسه با شاخص های UHI و مؤلفه های انرژی، کمتر در شبکه روابط مفهومی مطالعات ظاهر شده اند.

در مجموع، تحلیل هم رخدادی نشان می دهد که شبکه مفهومی مطالعات مورد بررسی حول سه محور اصلی سازمان یافته است: نخست، پیوند میان تعامل UHI-UPI و تقاضای انرژی؛ دوم، پیوند میان شرایط هواشناسی و شدت زمانی-مکانی UHI؛ و سوم، پیوند محدودتر اما مهم میان لایه مرزی، فرایندهای شیمیایی و ویژگی های سطح شهری. این الگو نشان می دهد که ادبیات موجود بیش از همه بر پیامدهای انرژی محور گرمایش شهری و پیش بینی شدت UHI تمرکز داشته است، در حالی که سازوکارهای جوی، شیمیایی و انتقالی مؤثر بر تعامل UHI و UPI کمتر مورد توجه قرار گرفته اند.

۴-۲. سنتز مفهومی یافته ها

نتایج حاصل از تحلیل فراوانی و هم رخدادی را می توان در قالب چهار گزاره مفهومی خلاصه کرد.

نخست، تقاضای انرژی در ادبیات موجود نقش یک مفهوم واسطه را میان UHI و UPI ایفا می کند. اگرچه کد مدل سازی و پیش بینی بیشترین فراوانی را در تحلیل کدها داشت، اما روابط هم رخدادی نشان داد که تقاضای انرژی یکی از مهم ترین نقاط اتصال مفهومی میان گرمایش شهری، آلودگی هوا و پیامدهای عملکردی شهر است. این یافته نشان می دهد که انرژی در مطالعات مورد بررسی صرفاً به عنوان پیامد UHI مطرح نشده، بلکه به عنوان حلقه ای برای پیوند دادن شرایط حرارتی شهر، مصرف انرژی و الگوهای آلودگی هوا عمل کرده است.

دوم، ادبیات موجود بیشتر UHI محور است تا UPI محور. فراوانی بالاتر شاخص های شدت و الگوهای زمانی-مکانی UHI و هم رخدادی نسبتاً قوی آن با پارامترهای هواشناسی نشان می دهد که بعد حرارتی شهر در ادبیات به خوبی توسعه یافته است. در مقابل، فراوانی و هم رخدادی پایین شاخص های غلظت و ترکیب آلاینده های هوا نشان می دهد که بعد آلودگی شهری هنوز به اندازه کافی در چارچوب های تحلیلی یکپارچه وارد نشده است.

سوم، فرایندهای لایه مرزی و شیمی جو هنوز به صورت محدود در مطالعات موجود ادغام شده اند. اگرچه برخی روابط میان پویایی لایه مرزی، اختلاط هوا، فرایندهای شیمیایی و ویژگی های سطح شهری مشاهده شد، اما شدت این روابط در مقایسه با محورها انرژی، مدل سازی و UHI پایین تر است. این در حالی است که سازوکارهایی مانند ارتفاع لایه مرزی، پایداری جوی، اختلاط عمودی، تهویه شهری، تشکیل آلاینده های ثانویه و واکنش های فتوشیمیایی برای فهم دقیق تعامل UHI و UPI اهمیت اساسی دارند.

چهارم، مدل سازی در ادبیات جایگاه غالبی دارد، اما اغلب به صورت بخشی و غیر یکپارچه به کار رفته است. نتایج فراوانی نشان داد که رویکردهای مدل سازی و پیش بینی بیشترین سهم را در میان کدهای اصلی دارند. با این حال، تحلیل هم رخدادی نشان می دهد که این مدل ها عمدتاً در ارتباط با شدت UHI و تقاضای انرژی ظاهر شده اند و کمتر به ادغام هم زمان ویژگی های سطح شهری، شرایط هواشناسی، پویایی لایه مرزی، شیمی جو، شاخص های UPI و تقاضای انرژی پرداخته اند.

بر اساس این سنتز، می‌توان نتیجه گرفت که ادبیات موجود عمدتاً حول یک مسیر غالب سازمان یافته است: ویژگی‌های سطح شهری و شرایط هواشناسی در تبیین شدت و الگوهای زمانی-مکانی UHI نقش دارند؛ UHI از طریق افزایش دمای محیط شهری با تقاضای انرژی، به‌ویژه بار سرمایشی، پیوند می‌یابد؛ و این تغییرات می‌توانند به‌طور مستقیم یا غیرمستقیم با الگوهای آلودگی هوا مرتبط شوند. با این حال، مسیرهای مرتبط با شیمی جو، پویایی لایه مرزی و شاخص‌های دقیق UPI هنوز کمتر توسعه یافته‌اند. این یافته‌ها مبنایی برای تدوین چارچوب مفهومی پژوهش و بحث درباره شکاف‌های پژوهشی فراهم می‌کنند.

۶. بحث

۶-۱. مقایسه‌ی نتایج پژوهش با سایر پژوهش‌ها

یافته‌ی نخست این پژوهش مبنی بر غلبه‌ی رویکرد مدل‌محور و انرژی‌محور در ادبیات UHI-UPI-Energy با پژوهش‌های معاصر همخوانی کامل دارد. مطالعه‌ی Song و همکاران (۲۰۲۴) بر پیوند میان ریزاقلیم شهری، سیستم‌های انرژی و بخش ساختمان تأکید کرده و تعاملات پویای میان این سه حوزه را تشدیدکننده‌ی مصرف انرژی و انتشار کربن معرفی می‌نماید. همچنین مطالعه‌ی جامع که چارچوب تحلیلی یکپارچه‌ای با ترکیب مدل معادلات ساختاری (SEM) و یادگیری ماشین (XGBoost-SHAP) را برای شناسایی محرک‌های غیرمستقیم و تعاملات غیرخطی در ۲۶۹ شهر چین توسعه داده، به‌وضوح نشان می‌دهد که ادبیات موجود به‌سوی مدل‌سازی یکپارچه و کمی حرکت کرده است. افزون بر این، یافته‌ی دوم پژوهش حاضر یعنی کم‌توجهی نسبی به UPI و شاخص‌های آلاینده‌ها نیز در پژوهش‌های جدید بازتاب یافته است. مطالعه‌ی چیخوویچ و بوخنیک (۲۰۲۴) در مجله‌ی Anthropocene نشان می‌دهد که با وجود افزایش پژوهش‌ها درباره‌ی تعامل UHI و UPI، همچنان تمرکز اصلی بر بعد حرارتی شهر باقی مانده است. با این حال، پژوهش‌های اخیر گام‌های مهمی در جهت پر کردن این شکاف برداشته‌اند؛ به‌گونه‌ای که مطالعه‌ی دی برناردینو و همکاران (۲۰۲۴) در رم، شدت جزیره‌ی آلودگی شهری (UPII) را با استفاده از اندازه‌گیری‌های PM در ایستگاه‌های زمینی ارزیابی کرده و مطالعه‌ی نیو و همکاران (۲۰۲۴) الگوهای مکانی-زمانی جزیره‌ی آلودگی هوا را برای ۲۲۷۳ شهر در چین بررسی کرده است. همچنین در سطح مفهومی، سینها و همکاران (۲۰۲۴) مرور جامعی بر پیوندهای UHI و UPI در کشورهای گرمسیری انجام داده‌اند. یافته‌ی سوم پژوهش حاضر مبنی بر ضعف ادغام لایه‌ی مرزی و شیمی جو نیز با پیشرفته‌ترین پژوهش‌های سال ۲۰۲۴ تأیید می‌شود. مطالعه‌ی در مجله‌ی Atmospheric Environment (دسامبر ۲۰۲۴) با استفاده از مدل شیمی جو WRF-Chem به‌صراحت نشان داده است که جزیره‌ی گرمایی شهری و گردش لایه‌ی مرزی جو از عوامل مهم مؤثر بر حمل‌ونقل و توزیع مکانی-زمانی ذرات معلق در شهرها هستند و بهبود جزئیات مدل کانوپی شهری، خطای شبیه‌سازی PM_{2.5} را در طول روز از ۱۸/۲۴ درصد به ۳/۲۸ درصد کاهش داده است. همچنین مطالعه‌ی پارک و همکاران (۲۰۲۴) در Scientific Reports به‌طور سیستماتیک نشان داده است که افزایش آلودگی سقف، اگرچه شدت UHI را کاهش می‌دهد، اما با کاهش ارتفاع لایه‌ی مرزی سیاره‌ای (PBL)، غلظت آلاینده‌های سطحی را تا ۱۱۵ درصد افزایش می‌دهد و این یافته به‌خوبی نشان می‌دهد که بی‌توجهی به فرایندهای لایه‌ی مرزی می‌تواند به راهکارهای متناقض و ناکارآمد در مدیریت هم‌زمان UHI و UPI منجر شود.

۶-۲. تفاوت‌های نتایج پژوهش با سایر پژوهش‌ها

با وجود همخوانی کلی، یافته‌های این پژوهش تفاوت‌های مهمی با سایر پژوهش‌ها دارد که نشان‌دهنده‌ی نوآوری روش‌شناختی و مفهومی آن است. نخست، در حالی که اکثر پژوهش‌های پیشین (مانند مطالعه‌ی جامع بر روی ۲۶۹ شهر چین) بر روی داده‌های کمی و مدل‌های عددی متمرکز بوده‌اند، پژوهش حاضر با رویکرد تحلیل محتوای کیفی و با استفاده از نرم‌افزار

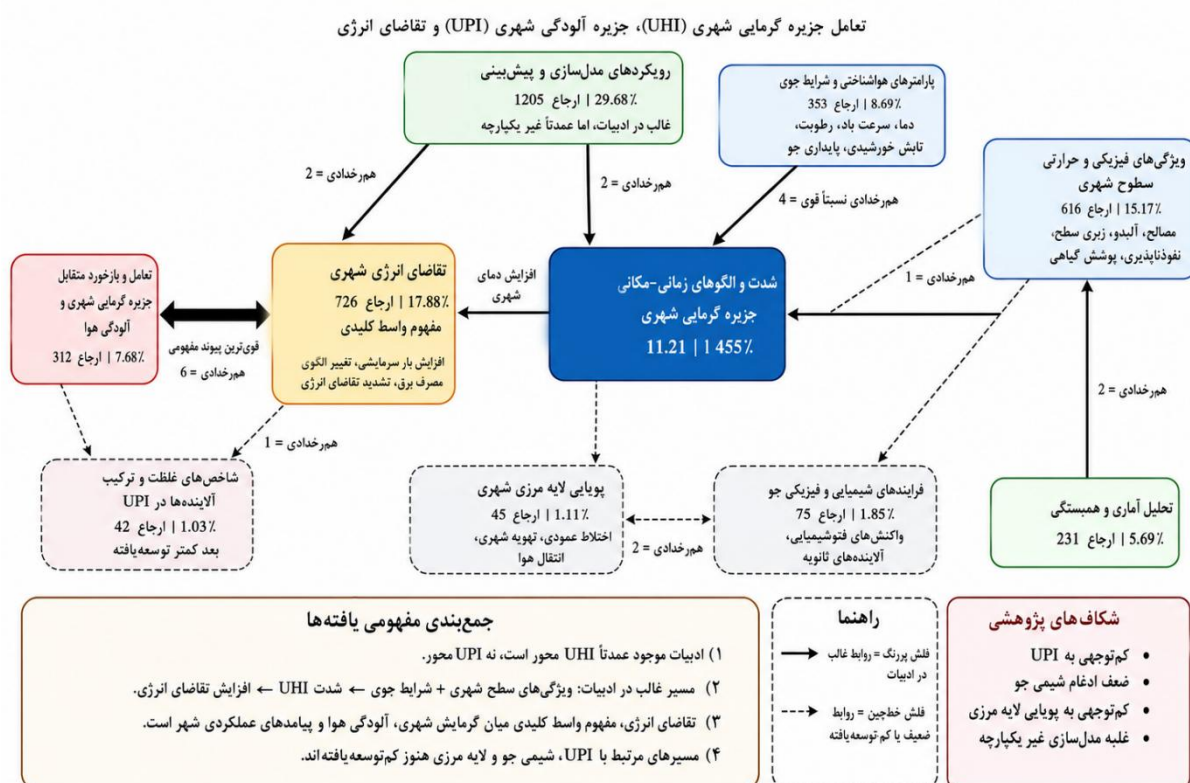
MAXQDA، الگوهای پنهان در ادبیات پژوهش را آشکار ساخته است. این روش امکان شناسایی شکاف‌هایی را فراهم می‌آورد که در تحلیل‌های کمی صرف قابل تشخیص نیستند؛ از جمله ضعف پیوند میان مدل‌سازی با UPI، شیمی جو و پویایی لایه‌ی مرزی. دوم، در حالی که پژوهش‌هایی مانند مطالعه‌ی وو و همکاران (۲۰۲۴) بر راهکارهای کنترلی هم‌زمان UHI و UPI با استفاده از زیرساخت‌های سبز متمرکز شده‌اند، پژوهش حاضر با رویکردی فرا-نظری نشان داده است که پیش از ارائه‌ی راهکار، نیاز به بازتعریف چارچوب مفهومی و شناسایی مؤلفه‌های مغفول‌مانده وجود دارد. این تفاوت در سطح تحلیل (راهکار در برابر چارچوب) نشان‌دهنده‌ی جایگاه متمایز این پژوهش در سیر تکاملی ادبیات موضوع است. سوم، پژوهش‌های اخیر مانند مطالعه‌ی دهلی (۲۰۲۶) مفهوم جدید شاخص ترکیبی گرمای شهری و آلودگی (UHPI) را معرفی کرده‌اند که هر دو بعد حرارت و آلودگی را توأمان در نظر می‌گیرد. با این حال، پژوهش حاضر فراتر رفته و نشان داده است که حتی این شاخص‌های ترکیبی نیز بدون توجه به فرایندهای دینامیکی جو و شیمی اتمسفر ناقص خواهند بود؛ به عبارت دیگر، پژوهش حاضر نه تنها بر ضرورت یکپارچگی UHI و UPI تأکید دارد، بلکه لایه‌ی مرزی و شیمی جو را به عنوان حلقه‌های گم‌شده‌ی اصلی معرفی می‌کند که در پژوهش‌های پیشین به‌ندرت مورد توجه قرار گرفته است.

۳-۶. جایگاه نتایج و کمک به پژوهش‌های آینده

یافته‌های این پژوهش از چند جهت به غنای ادبیات UHI–UPI–Energy می‌افزاید و راهگشای پژوهش‌های آینده است. نخست، پژوهش حاضر با شناسایی سه شکاف اصلی (سلطه‌ی مدل‌سازی انرژی‌محور، کم‌توجهی به UPI، و ضعف ادغام لایه‌ی مرزی و شیمی جو)، نقشه‌راهی روشن برای پژوهشگران آینده ترسیم می‌کند و نشان می‌دهد که یکپارچگی موردنیاز باید شامل مؤلفه‌های جوی و شیمیایی نیز باشد. دوم، یافته‌های هم‌رخدادی این پژوهش نشان داد که مدل‌سازی بیشتر با UHI و تقاضای انرژی پیوند دارد و ارتباط آن با UPI، شیمی جو و پویایی لایه‌ی مرزی محدودتر است؛ این یافته، که در پژوهش‌های کمی پیشین کمتر به آن پرداخته شده، هشدار مهمی برای پژوهشگران حوزه‌ی مدل‌سازی شهری محسوب می‌شود و مطالعه‌ی RESTART در رم (۲۰۲۵–۲۰۲۴) که به‌ویژه به بررسی تعامل UHI و UPI با رویکرد مبتنی بر مشاهدات هواشناسی پرداخته است، به‌نوعی مسیر چنین پژوهش‌هایی را توجیه نظری می‌کند. سوم، پژوهش حاضر با ارائه‌ی مدل مفهومی (شکل ۴) که در آن ویژگی‌های سطح شهری، شدت و الگوهای UHI، پارامترهای هواشناختی، پویایی لایه‌ی مرزی، فرایندهای شیمیایی جو، شاخص‌های UPI و تقاضای انرژی به‌صورت هم‌زمان در نظر گرفته شده‌اند، چارچوبی عملیاتی برای توسعه‌ی مدل‌های یکپارچه‌ی آینده فراهم می‌آورد؛ همان‌گونه که مطالعه‌ی WRF-Chem در لیائونینگ چین نشان داد، بهبود جزئیات مدل‌سازی کانوپی شهری می‌تواند دقت شبیه‌سازی را به‌طور چشمگیری افزایش دهد و پژوهش حاضر با تأکید بر اهمیت این مؤلفه‌ها، ضرورت سرمایه‌گذاری بیشتر در توسعه‌ی مدل‌های جفت‌شده‌ی هواشناسی–شیمیایی را یادآوری می‌کند. چهارم، همان‌گونه که مطالعه‌ی بولونیا (۲۰۲۵) نشان داد که نادیده‌گرفتن فضای سبز خصوصی می‌تواند به نقش آن در کاهش UHI و UPI منجر شود، پژوهش حاضر نشان می‌دهد که نادیده‌گرفتن فرایندهای لایه‌ی مرزی و شیمی جو نیز می‌تواند به راهکارهای ناقص و حتی تناقض‌آمیز در مدیریت کیفیت هوای شهری بیانجامد. از این رو، پژوهش‌های آینده ناگزیر از اتخاذ رویکردهای یکپارچه و چندبعدی هستند و پژوهش حاضر با شناسایی دقیق ابعاد مغفول‌مانده، گامی اساسی در جهت ترسیم افق‌های نوین پژوهشی در حوزه‌ی اقلیم‌شناسی شهری برداشته است.

در تبیین علل ریشه‌ای این شکاف‌ها، به‌ویژه کم‌توجهی به لایه‌ی مرزی و شیمی جو، باید به چند عامل بنیادین اشاره کرد. نخست، پیچیدگی ذاتی فرآیندهای اتمسفری و دشواری بررسی هم‌زمان فرآیندهای دینامیکی (تلاطم، اختلاط عمودی، تهویه‌ی

شهری) و شیمیایی (واکنش‌های فتوشیمیایی، تشکیل آلاینده‌های ثانویه) در مقیاس شهری، نیازمند تخصص‌های میان‌رشته‌ای در حوزه‌های هواشناسی، شیمی اتمسفر و فیزیک شهری است که در بسیاری از پژوهش‌های تک‌بخشی کمتر دیده می‌شود. دوم، محدودیت‌های جدی در دسترسی به داده‌های تخصصی نظیر پروفیل عمودی دما، سرعت باد، ارتفاع لایه اختلاط و شارهای حرارتی سطح، که در بسیاری از شهرها به دلیل محدودیت شبکه‌های پایش و هزینه‌های بالای اندازه‌گیری در دسترس نیست (Oke, 1988; Fernando, 2010). سوم، تمرکز تاریخی مطالعات جزیره گرمایی شهری بر متغیرهای سطح‌محور و قابل‌مشاهده از طریق سنجش از دور (مانند دمای سطح زمین و پوشش زمین) موجب شده است که پژوهشگران به‌طور طبیعی به سراغ متغیرهایی بروند که به‌راحتی قابل‌استخراج و نقشه‌سازی هستند؛ در حالی‌که فرآیندهای جوی ماهیتی سه‌بعدی و پویا دارند. چهارم، تحلیل ارتباط میان ساختار شهری و کیفیت هوا نیازمند مدل‌های پیشرفته‌ی جفت‌شده‌ی هواشناسی-شیمیایی (مانند WRF-Chem) و زیرساخت‌های محاسباتی سنگین است (Seinfeld & Pandis, 2016) که بسیاری از پژوهشگران را به‌سوی رویکردهای ساده‌تر و تک‌بعدی سوق داده است. پنجم، ماهیت غیرمستقیم و میانجی‌گر نقش لایه‌ی مرزی و شیمی جو در روابط UHI-UPI-Energy باعث شده است که این فرآیندها در بسیاری از چارچوب‌های تحلیلی به‌عنوان متغیرهای حاشیه‌ای در نظر گرفته شوند؛ در حالی‌که این فرآیندها نقش واسط میان ساختار شهری، شرایط حرارتی، انتشار آلاینده‌ها و مصرف انرژی را ایفا می‌کنند و نادیده‌گرفتن آن‌ها می‌تواند به درک ناقصی از بازخوردهای موجود در سیستم‌های شهری منجر شود. در شکل ۴، مدل مفهومی پژوهش نشان داده شده است.



شکل ۴: مدل مفهومی پژوهش

۷. نتیجه گیری

پژوهش حاضر با هدف فهم نظام‌مند رابطه میان جزیره گرمایی شهری، جزیره آلودگی شهری و تقاضای انرژی انجام شد و کوشید با اتکا بر تحلیل محتوای مطالعات منتخب، منطق مفهومی حاکم بر این حوزه را آشکار سازد. تحلیل ۴,۰۶۰ قطعه کدگذاری شده در نرم‌افزار MAXQDA نشان داد که ادبیات موجود بیش از آنکه بر یک چارچوب کاملاً یکپارچه استوار باشد، عمدتاً حول محور مدل‌سازی، پیش‌بینی و پیامدهای انرژی‌محور سازمان یافته است. فراوانی بالای کد «رویکردهای مدل‌سازی و پیش‌بینی» بیانگر آن است که بخش مهمی از مطالعات این حوزه به شبیه‌سازی شدت جزیره گرمایی شهری، پیش‌بینی تغییرات اقلیمی محلی و برآورد پیامدهای انرژی آن پرداخته‌اند. با این حال، غلبه این رویکرد به معنای یکپارچگی کامل مطالعات نیست؛ زیرا بسیاری از مدل‌ها بیشتر بر یک یا چند بعد محدود تمرکز کرده‌اند و کمتر توانسته‌اند گرمایش شهری، آلودگی هوا، تقاضای انرژی، شرایط جوی، پویایی لایه مرزی و فرایندهای شیمیایی جو را در قالب یک نظام تحلیلی پیوسته بررسی کنند.

مهم‌ترین دستاورد این پژوهش، برجسته شدن نقش «تقاضای انرژی شهری» به عنوان حلقه اتصال میان گرمایش شهری و آلودگی هواست. اگرچه مدل‌سازی پرتکرارترین محور در میان کدهای اصلی بود، اما تحلیل هم‌رخدادی نشان داد که قوی‌ترین پیوند مفهومی میان «تعامل جزیره گرمایی شهری و آلودگی هوا» و «تقاضای انرژی شهری» شکل گرفته است. این نتیجه نشان می‌دهد که در بخش قابل توجهی از ادبیات، رابطه میان UHI و UPI نه به صورت مستقیم، بلکه از مسیر پیامدهای انرژی‌محور تبیین شده است. افزایش دمای شهری، به‌ویژه در دوره‌های گرم، باعث افزایش بار سرمایشی، تغییر الگوی مصرف برق و تشدید نیاز انرژی در شهر می‌شود و همین روند می‌تواند از طریق افزایش مصرف سوخت، تولید برق، انتشار آلاینده‌ها و تغییر شرایط محیطی، با الگوهای آلودگی هوا پیوند پیدا کند. از این منظر، تقاضای انرژی تنها پیامد جزیره گرمایی شهری نیست، بلکه مفهومی واسطه است که میان شرایط حرارتی شهر، کیفیت هوا و عملکرد زیست‌محیطی - انرژی شهر ارتباط برقرار می‌کند.

یافته‌های پژوهش همچنین نشان داد که ادبیات موجود همچنان بیشتر بر بعد حرارتی شهر متمرکز است و نسبت به بعد آلودگی شهری توجه محدودتری دارد. شاخص‌های شدت و الگوهای زمانی - مکانی جزیره گرمایی شهری در مطالعات بررسی شده جایگاه نسبتاً پررنگی دارند، اما شاخص‌های مربوط به غلظت و ترکیب آلاینده‌ها کمترین فراوانی را در میان کدهای اصلی نشان داده‌اند. این عدم توازن نشان می‌دهد که UHI در ادبیات علمی به‌خوبی از نظر شدت، پراکنش مکانی، تغییرات زمانی و ارتباط با ویژگی‌های سطح شهری تحلیل شده است، اما UPI هنوز به همان اندازه در چارچوب‌های مفهومی و مدل‌سازی ادغام نشده است. در نتیجه، رابطه میان دمای شهری، ترکیب آلاینده‌ها، آلاینده‌های ثانویه، واکنش‌های فتوشیمیایی و مصرف انرژی همچنان یکی از بخش‌های کمتر توسعه‌یافته این حوزه به شمار می‌رود.

از سوی دیگر، نتایج نشان دادند که ویژگی‌های فیزیکی و حرارتی سطوح شهری و پارامترهای هواشناختی نقش مهمی در شکل‌گیری و تشدید جزیره گرمایی شهری دارند. عواملی مانند نوع مصالح، آلودگی، زبری سطح، نفوذناپذیری، پوشش گیاهی، دما، سرعت باد، رطوبت، تابش خورشیدی و پایداری جو می‌توانند شدت و الگوی زمانی - مکانی UHI را تحت تأثیر قرار دهند. بنابراین، جزیره گرمایی شهری را نمی‌توان پدیده‌ای صرفاً دمایی یا مستقل از ساختار کالبدی شهر دانست؛ بلکه این پدیده حاصل برهم‌کنش میان فرم شهری، ویژگی‌های سطح، شرایط اقلیمی محلی و فرایندهای جوی است. با وجود اهمیت این عوامل، پیوند آن‌ها با شاخص‌های دقیق آلودگی هوا و سازوکارهای شیمیایی جو هنوز در بسیاری از مطالعات به صورت محدود باقی مانده است.

یکی دیگر از نتایج مهم پژوهش، آشکار شدن ضعف نسبی ادبیات در توجه به پویایی لایه مرزی شهری و فرایندهای شیمیایی و فیزیکی جو بود. پایین بودن فراوانی این کدها و هم‌رخدادی محدود آن‌ها با سایر محورهای اصلی نشان می‌دهد که بسیاری از مطالعات، تعامل میان UHI و UPI را بیشتر از منظر پیامدهای قابل مشاهده، مانند افزایش دما یا رشد مصرف انرژی، بررسی کرده‌اند و کمتر به سازوکارهای عمیق‌تری پرداخته‌اند که رفتار آلاینده‌ها را در محیط شهری کنترل می‌کنند. فرایندهایی مانند اختلاط عمودی، تهویه شهری، پایداری جو، انتقال آلاینده‌ها، واکنش‌های فتوشیمیایی و تشکیل آلاینده‌های ثانویه برای توضیح دقیق رابطه میان گرمایش شهری و آلودگی هوا ضروری‌اند. کم‌توجهی به این سازوکارها می‌تواند سبب شود تحلیل‌ها در سطح توصیفی باقی بمانند و نتوانند پیچیدگی واقعی تعامل میان اقلیم شهری، کیفیت هوا و مصرف انرژی را نشان دهند.

برآیند یافته‌ها نشان می‌دهد که مسیر غالب در ادبیات موجود از ویژگی‌های سطح شهری و شرایط هواشناختی آغاز می‌شود، به تشدید جزیره گرمایی شهری می‌رسد، سپس از طریق افزایش دمای محیط به رشد تقاضای انرژی، به‌ویژه بار سرمایشی، منتهی می‌شود و در نهایت می‌تواند با تغییر یا تشدید الگوهای آلودگی هوا ارتباط پیدا کند. با این حال، این مسیر غالب هنوز همه ابعاد مسئله را پوشش نمی‌دهد. حلقه‌های مرتبط با UPI، شیمی جو و پویایی لایه مرزی در مقایسه با محورهای مدل‌سازی، انرژی و شدت UHI ضعیف‌تر توسعه یافته‌اند. همین مسئله نشان می‌دهد که چارچوب‌های موجود برای تبیین کامل رابطه UHI-UPI-Energy کافی نیستند و نیاز به بازنگری مفهومی و روش‌شناختی دارند.

بر اساس این نتایج، پژوهش حاضر بر ضرورت حرکت به سوی چارچوب‌های یکپارچه، چندمقیاسی و چندفرایندی تأکید می‌کند؛ چارچوب‌هایی که بتوانند هم‌زمان داده‌های اقلیم شهری، کیفیت هوا، مصرف انرژی، ویژگی‌های سطح شهری، شرایط هواشناختی، پویایی لایه مرزی و فرایندهای شیمیایی جو را در کنار یکدیگر تحلیل کنند. چنین رویکردی می‌تواند از نگاه‌های تک‌بخشی فراتر رود و تصویری دقیق‌تر از بازخوردهای میان گرمایش شهری، آلودگی هوا و مصرف انرژی ارائه دهد. دستاورد این نوع تحلیل، صرفاً گسترش دانش نظری نیست، بلکه می‌تواند مبنایی کاربردی برای سیاست‌گذاری شهری، کاهش شدت جزیره گرمایی، بهبود کیفیت هوا، کنترل مصرف انرژی و حرکت به سوی مدیریت پایدارتر شهرها فراهم سازد.

مشارکت نویسندگان

نویسنده اول (۲۵ درصد)، نویسنده دوم (۲۵ درصد)، نویسنده سوم (۲۵ درصد)، نویسنده چهارم (۲۵ درصد).

تشکر و قدردانی

هیچ حمایت مالی وجود ندارد.

تعارض منافع

نویسندگان هیچ تضاد منافع را اعلام نکردند.

منابع

Ahmed, A. N., AlDahoul, N., Aziz, N. A., Huang, Y. F., Sherif, M., & El-Shafie, A. (2025). *The urban heat Island effect: A review on predictive approaches using artificial intelligence models. City and Environment Interactions*, 28, Article 100234. <https://doi.org/10.1016/j.cacint.2025.100234>

- Akyol, I. C., Halacali, E. G., Ucar, S., Iseri, O. K., Yavuz, F., Guney, D., ... & Dino, I. G. (2025). Machine learning based prediction of long-term energy consumption and overheating under climate change impacts using urban building energy modeling. *Sustainable Cities and Society*, 130, 106500. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2025.106500>
- Amnuaylojaroen, T. (2025). Advancements and challenges of artificial intelligence in climate modeling for sustainable urban planning. *Frontiers in Artificial Intelligence*, 8, 1517986. <https://doi.org/10.3389/frai.2025.1517986>
- Anser, M. K., Nassani, A. A., Al-Aiban, K. M., Zaman, K., & Haffar, M. (2025). Urban heat islands and energy consumption patterns: Evaluating renewable energy strategies for a sustainable future. *Energy Reports*, 13, 3760-3772. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2025.03.033>
- Aruta, G., Ascione, F., Bianco, N., Mauro, G. M., & Villano, F. (2025). Artificial neural networks to forecast building heating/cooling demand and climate resilience based on envelope parameters and new climatic stress indices. *Journal of Building Engineering*, 108, 112849. [10.1016/j.jobbe.2025.112849](https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2025.112849)
- Aslani, A., Sereshti, M., & Sharifi, A. (2025). Urban heat island mitigation in Tehran: District-based mapping and analysis of key drivers. *Sustainable Cities and Society*, 125, 106338. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2025.106338>
- Azargoshasbi, F., & Minet, L. (2025). Modeling climate change impacts on urban population exposure to heat stress dynamics in Vancouver and Victoria, Canada. *Sustainable Cities and Society*, 106992. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2025.106992>
- Aziz, A., Mahmood, D., Qureshi, M. S., Qureshi, M. B., & Kim, K. (2024). AI-based peak power demand forecasting model focusing on economic and climate features. *Frontiers in Energy Research*, 12, 1328891. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2024.1328891>
- Bahadori, E., Rezaei, F., He, B. J., Heiranipour, M., & Attia, S. (2025). Evaluating urban heat island mitigation strategies through coupled UHI and building energy modeling. *Building and Environment*, 280, 113111. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2025.113111>
- Chen, Y., You, W., Ou, L., & Tang, H. (2025). A review of machine learning techniques for urban resilience research: The application and progress of different machine learning techniques in assessing and enhancing urban resilience. *Systems and Soft Computing*, 7, 200269. <https://doi.org/10.1016/j.sasc.2025.200269>
- Cheval, S., Amihăesei, V. A., Chitu, Z., Dumitrescu, A., Falcescu, V., Iraşoc, A., ... & Tudose, N. C. (2024). A systematic review of urban heat island and heat waves research (1991–2022). *Climate Risk Management*, 44, 100603. <https://doi.org/10.1016/j.crm.2024.100603>
- Cheval, S., Amihăesei, V. A., Chitu, Z., Dumitrescu, A., Falcescu, V., Iraşoc, A., ... & Tudose, N. C. (2024). A systematic review of urban heat island and heat waves research (1991–2022). *Climate Risk Management*, 44, 100603. <https://doi.org/10.1016/j.crm.2024.100603>
- Cheval, S., Amihăesei, V.-A., Chitu, Z., Dumitrescu, A., Falcescu, V., Iraşoc, A., Micu, D. M., Mihuleţ, V., Ontel, I., Paraschiv, M.-G., & Tudose, N. C. (2024). A systematic review of urban heat island and heat waves research (1991–2022). *Climate Risk Management*, 44, Article 100603. <https://doi.org/10.1016/j.crm.2024.100603>
- Choi, B., Bergés, M., & Pozzi, M. (2026). Value of probabilistic spatiotemporal urban temperature forecasts for building energy purchases in day-ahead market. *Energy and Buildings*, 116961. [10.1016/j.enbuild.2026.116961](https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2026.116961)
- Cichowicz, R., & Bochenek, A. D. (2024). Assessing the effects of urban heat islands and air pollution on human quality of life. *Anthropocene*, 46, 100433. <https://doi.org/10.1016/j.ancene.2024.100433>

- Cina, E., Elbasi, E., Elmazi, G., & AlArnaout, Z. (2025). The role of AI in predictive modelling for sustainable urban development: Challenges and opportunities. *Sustainability*, 17(11), 5148. <https://doi.org/10.3390/su17115148>
- Darvishvand, L., Kamkari, B., Huang, M. J., & Hewitt, N. J. (2025). A systematic review of explainable artificial intelligence in urban building energy modeling: methods, applications, and future directions. *Sustainable Cities and Society*, 128, 106492. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2025.106492>
- Delgado-Enales, I., Lizundia-Loyola, J., Molina-Costa, P., & Del Ser, J. (2025). A machine learning approach for the efficient estimation of ground-level air temperature in urban areas. *Urban Climate*, 61, 102415. [10.1016/j.uclim.2025.102415](https://doi.org/10.1016/j.uclim.2025.102415)
- Di Bernardino, A., Argentini, S., Brattich, E., Campanelli, M., Casasanta, G., Cecilia, A., ... & Siani, A. M. (2025). Influence of atmospheric parameters on the interaction between Urban Heat and Pollution Islands in a Mediterranean coastal city. *Atmospheric Research*, 108702. [10.1016/j.atmosres.2025.108702](https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2025.108702)
- Di Bernardino, A., Erriu, M., Argentini, S., Campanelli, M., Casasanta, G., Cecilia, A., ... & Siani, A. M. (2024). Assessment of the urban pollution island intensity in Rome (Italy) from in-situ PM measurements. *Bulletin of Atmospheric Science and Technology*, 5(1), 10. <https://doi.org/10.1007/s42865-024-00071-0>
- Ehtsham, M., Rotilio, M., & Cucchiella, F. (2025). Multi-Scale Energy Forecasting in Smart Households: Leveraging AI and Remotely Sensed Climate Data for Sustainable Energy Management. *Results in Engineering*, 108281. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.108281>
- Fathi, S., Srinivasan, R., Fenner, A., & Fathi, S. (2020). Machine learning applications in urban building energy performance forecasting: A systematic review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 133, 110287. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110287>
- Federer, F., Weibel, F., Huggel, C., Vaghefi, A. S., & Muccione, V. (2026). Exploratory modeling and analysis of adaptation to urban heat stress under climate change in Switzerland. *Urban Climate*, 65, 102729. [10.1016/j.uclim.2025.102729](https://doi.org/10.1016/j.uclim.2025.102729)
- Fernando, H. J. S. (2010). Fluid dynamics of urban atmospheres in complex terrain. *Annual review of fluid mechanics*, 42(1), 365-389. <https://doi.org/10.1146/annurev-fluid-121108-145459>
- Frayssinet, L., Merlier, L., Kuznik, F., Hubert, J. L., Milliez, M., & Roux, J. J. (2018). Modeling the heating and cooling energy demand of urban buildings at city scale. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 81, 2318-2327. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.06.040>
- Gui, B., Bhardwaj, A., & Sam, L. (2025). A novel multi-scale deep learning framework for adaptive urban expansion simulation. *Sustainable Cities and Society*, 130, 106594. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2025.106594>
- Hashemi, F., & Mills, G. (2025). On the impact of urban climate and heat islands on building energy performance: A critical review. *Energy and Buildings*, 343, 115946. [10.1016/j.enbuild.2025.115946](https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2025.115946)
- Heydari, Ali and Lotfi, Sahand and Sholeh, Mahsa, Integrating Machine Learning Tools for Climate-Responsive Urban Design in Historical Urban Spaces: Case Study of Typical Historical Spaces in Shiraz. Available at SSRN: <https://ssrn.com/abstract=5561952> or <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.5561952>
- Karimi, A., Moreno-Rangel, D., & García-Martínez, A. (2026). AI-driven morphological optimization for resilient retrofitting of mediterranean housing stock under compounded urban heat island and heatwave effects. *Building and Environment*, 114266. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2026.114266>
- Lai, Y., Lai, E., Li, J., & Xia, J. (2024). *Urban intelligence for extreme heat mitigation and adaptation: Experience in Asian cities*. TECH MONITOR.

- Lefevre, A., Malet-Damour, B., Boyer, H., & Riviere, G. (2025). Urban heat island in the tropics: A review of advances, challenges, and future directions. *City and Environment Interactions*, 100265. <https://doi.org/10.1016/j.cacint.2025.100265>
- Litardo, J. A. Q. U. E. L. I. N. E., Palme, M., Borbor-Córdova, M., Caiza, R., Macías, J., Hidalgo-León, R., & Soriano, G. (2020). Urban Heat Island intensity and buildings' energy needs in Duran, Ecuador: Simulation studies and proposal of mitigation strategies. *Sustainable cities and society*, 62, 102387. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102387>
- Liu, H., Tan, M., & Cao, R. (2026). The role of AI in promoting urban sustainable development: Evidence from China's new generation of national AI innovative development pilot zones. *Applied Geography*, 188, 103906. [10.1016/j.apgeog.2026.103906](https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2026.103906)
- Liu, S., Cai, M., Ren, C., Chen, G., Nielsen, C. P., & Samuelson, H. (2025). Urban heat island impacts on cooling energy demand of residential buildings at the city scale: a case study of Hong Kong. *Energy*, 332, 137165. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2025.137165>
- Liu, X., Liu, R., Zhang, X., Abate, A. G., Nielsen, P. S., & Keles, D. (2026). IoT-enabled interoperability for energy-mobility integration: A systematic review of protocols, platforms, and standards. *Applied Energy*, 411, 127611. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2026.127611>
- Majnoon, A., & Saifoddin, A. (2025). AI-driven energy optimization enhancing efficiency in urban environments with hybrid machine learning models. *Cleaner Engineering and Technology*, 101072. <https://doi.org/10.1016/j.clet.2025.101072>
- Manapragada, N. V. S. K., & Natanian, J. (2025). Urban microclimate and energy modeling: a review of integration approaches. *Sustainability*, 17(7), 3025. <https://doi.org/10.3390/su17073025>
- Marey, A., Wang, L. L., Gaur, A., Lu, H., Leroyer, S., & Belair, S. (2025). Urban climate simulation for extreme heat events—A comparison between WRF and GEM. *Urban Climate*, 63, 102570. [10.1016/j.uclim.2025.102570](https://doi.org/10.1016/j.uclim.2025.102570)
- Maroofiazar, R., & Reveshti, A. M. (2026). Integrating Remote Sensing and Machine Learning for Enhanced Surface Urban Heat Island Analysis and Its Impact on Building Energy Demand. *Energy Science & Engineering*. <https://doi.org/10.1002/ese3.70463> Digital Object Identifier (DOI)
- Mekonnen, G. T., Berlie, A. B., Wubie, M. A., & Legesse, S. A. (2025). Surface urban heat island intensity and urban utility consumption: impact analysis and projections. *The Scientific World Journal*, 2025(1), 3250112. <https://doi.org/10.1155/tswj/3250112>
- Ni, X., Chang, Y., Bai, T., Liu, P., Song, H., Wang, F., & Jin, M. (2025). Projections of urban heat island effects under future climate scenarios: A case study in Zhengzhou, China. *Remote Sensing*, 17(15), Article 2660. <https://doi.org/10.3390/rs17152660>
- Niu, L., Zhang, Z., Liang, Y., & van Vliet, J. (2024). Spatiotemporal patterns and drivers of the urban air pollution island effect for 2273 cities in China. *Environment International*, 184, 108455. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2024.108455>
- Oke, T. R. (1988). Street design and urban canopy layer climate. *Energy and buildings*, 11(1-3), 103-113. [https://doi.org/10.1016/0378-7788\(88\)90026-6](https://doi.org/10.1016/0378-7788(88)90026-6)
- Park, K., & Baik, J. J. (2024). Nonlinear changes in urban heat island intensity, urban breeze intensity, and urban air pollutant concentration with roof albedo. *Scientific Reports*, 14(1), 24911. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-76935-4>
- Rezazadeh, A. A., Avami, A., & Hassanvand, M. S. (2025). Energy planning in urban areas under climate change: An integrated energy-emission-health optimization model. *Energy Reports*. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2025.08.017>

- Rui, J., Shabrina, Z., & Gong, W. (2026). Artificial intelligence applications in urban extreme heat management: A systematic review of forecasting, monitoring, mitigation and decision support. *Environmental Impact Assessment Review*, 119, 108363. <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2026.108363>
- Salhi, A., Algarni, F., Alshamrani, R., Althbiti, A., Ismail, A., & Hassan, B. M. (2025). Leveraging artificial intelligence to enable sustainable urban development through the creation of smart and environmentally friendly carbon-free cities. *Scientific Reports*, 15(1), 35791. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-16801-z>
- Santamouris, M. (2015). Analyzing the heat island magnitude and characteristics in one hundred Asian and Australian cities and regions. *Science of the Total Environment*, 512, 582-598. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.01.060>
- Seinfeld, J. H., & Pandis, S. N. (2016). Atmospheric chemistry and physics: from air pollution to climate change. John Wiley & Sons. https://books.google.co.uk/books?id=n_RmCgAAQBAJ&lpg=PR5&ots=gTNbBJrfeJ&dq=Seinfeld
- Shawon, S. M., Haider, S. N., Barua, A., Austin, S., Adan, I. A., Hossain, M. S., & Zubair, H. T. (2025). Hybrid CNN-LSTM model for urban energy load forecasting with IGA-XAI for smart grids: peak and off-peak variability insights. *Results in Engineering*, 107245. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.107245>
- Shen, P. (2025). Spatiotemporal mapping of urban air temperature and UHI under TMY condition: A reference station based machine learning approach. *Energy and Buildings*, 343, 115923. [10.1016/j.enbuild.2025.115923](https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2025.115923)
- Singh, M., & Sharston, R. (2022). Quantifying the dualistic nature of urban heat Island effect (UHI) on building energy consumption. *Energy and Buildings*, 255, 111649. [10.1016/j.enbuild.2021.111649](https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111649)
- Sinha, S., Banerjee, A., Patnaik, A., & Paul, S. K. (2024). Exploring the linkages between urban heat islands and urban pollution islands in tropical countries: A comprehensive review. *Developments in Environmental Science*, 15, 529-554. <https://doi.org/10.1016/B978-0-443-21948-1.00025-X>
- Siqi, J., & Yuhong, W. (2020). Effects of land use and land cover pattern on urban temperature variations: a case study in Hong Kong. *Urban Clim* 34: 100693. [10.1016/j.uclim.2020.100693](https://doi.org/10.1016/j.uclim.2020.100693)
- Snaiki, R., & Merabtine, A. (2025). Recent advances on machine learning techniques for urban heat island applications: a review and new horizons. *Sustainable Cities and Society*, 106943. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2025.106943>
- Solís-Villarreal, J. A., Soto-Mendoza, V., Navarro-Acosta, J. A., & Ruiz-y-Ruiz, E. (2024). Energy consumption outlier detection with AI models in modern cities: a case study from north-eastern Mexico. *Algorithms*, 17(8), 322 <https://doi.org/10.3390/a17080322>
- Song, Y., Zhang, Z., & Hui, H. (2024). Interdisciplinary collaborative perspectives: Urban microclimate, urban energy systems, and urban building sectors. *The Innovation*. <https://doi.org/10.59717/j.xinn-energy.2024.100053>
- Tehrani, A. A., Sobhaninia, S., Nikookar, N., Levinson, R., Sailor, D. J., & Amaripadath, D. (2025). Data-driven approach to estimate urban heat island impacts on building energy consumption. *Energy*, 316, 134508. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2025.134508>
- Tiwari, A., Kukreja, R., Subramanian, S., Devkar, A., Mahabir, R., Gkountouna, O., & Croitoru, A. (2025). Machine Learning for Sustainable Urban Energy Planning: A Comparative Model Analysis. *Energies*, 19(1), 176. <https://doi.org/10.3390/en19010176>
- Ulpiani, G. (2021). On the linkage between urban heat island and urban pollution island: Three-decade literature review towards a conceptual framework. *Science of the total environment*, 751, 141727. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141727>

- Ventura, S., Miró, J. R., Camacho-Caballero, D., Casellas, E., Segura-Barrero, R., Martilli, A., & Villalba, G. (2026). Adapting urban areas to rising temperatures: Strategies to reduce heat and vulnerability in a warming world. *Urban Climate*, 65, 102757. [10.1016/j.uclim.2025.102757](https://doi.org/10.1016/j.uclim.2025.102757)
- Ventura, S., Miró, J. R., Camacho-Caballero, D., Casellas, E., Segura-Barrero, R., Martilli, A., & Villalba, G. (2024). Adapting urban areas to rising temperatures: Strategies to reduce heat and vulnerability in a warming world. *Sustainable Cities and Society*, 107, Article 105437. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2024.105437>
- Vitanova, L., Petrova-Antonova, D., & Shirinyan, E. (2025). Urban digital twin for assessing and understanding urban Heat Island impacts. *Urban Climate*, 62, 102530. [10.1016/j.uclim.2025.102530](https://doi.org/10.1016/j.uclim.2025.102530)
- Wu, Q., Huang, Y., Irga, P., Kumar, P., Li, W., Wei, W., ... & Zhou, J. L. (2024). Synergistic control of urban heat island and urban pollution island effects using green infrastructure. *Journal of environmental management*, 370, 122985. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.122985>
- Xie, Z., Wu, Y., Zhang, F., Chen, M., Sun, L., & Qian, Z. (2025). Mining the driving factors of the urban thermal environment by building semantic information at block level A case study of Shenyang. *Urban Climate*, 61, 102404. [10.1016/j.uclim.2025.102404](https://doi.org/10.1016/j.uclim.2025.102404)
- Zhang, M., Li, Z., & Yu, Z. (2025). Machine Learning-based regional cooling demand prediction with Optimized dataset partitioning. *Energy and Buildings*, 344, 116004. [10.1016/j.enbuild.2025.116004](https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2025.116004)
- Zhang, W., Liu, Z., Li, X., Mao, Y., Ma, Y., & Liao, H. (2024). Impact of urbanized atmosphere-land processing to the near-ground distribution of air pollution over Central Liaoning Urban Agglomeration. *Atmospheric Environment*, 339, 120866. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2024.120866>
- Zhang, Z., Zhao, J., Sahut, J. M., Song, Y., & Guesmi, K. (2026). The impact of artificial intelligence on urban energy consumption. *Technovation*, 150, 103433. [10.1016/j.technovation.2025.103433](https://doi.org/10.1016/j.technovation.2025.103433)
- Zhao, F., Zhang, M., Zhu, S., Zhang, X., Ma, S., Gao, Y., ... & Shen, Y. (2025). Spatiotemporal patterns of the urban thermal environment and the impact of human activities in low-latitude plateau cities. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 142, 104703. [10.1016/j.jag.2025.104703](https://doi.org/10.1016/j.jag.2025.104703)
- Zhu, Y., Zhu, Y., & Liang, X. (2026). Integrating land use dynamics and human health risk: A multi-scale assessment of future urban heat exposure using PLUS and explainable AI. *Journal of Environmental Management*, 398, 128586. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2026.128586>